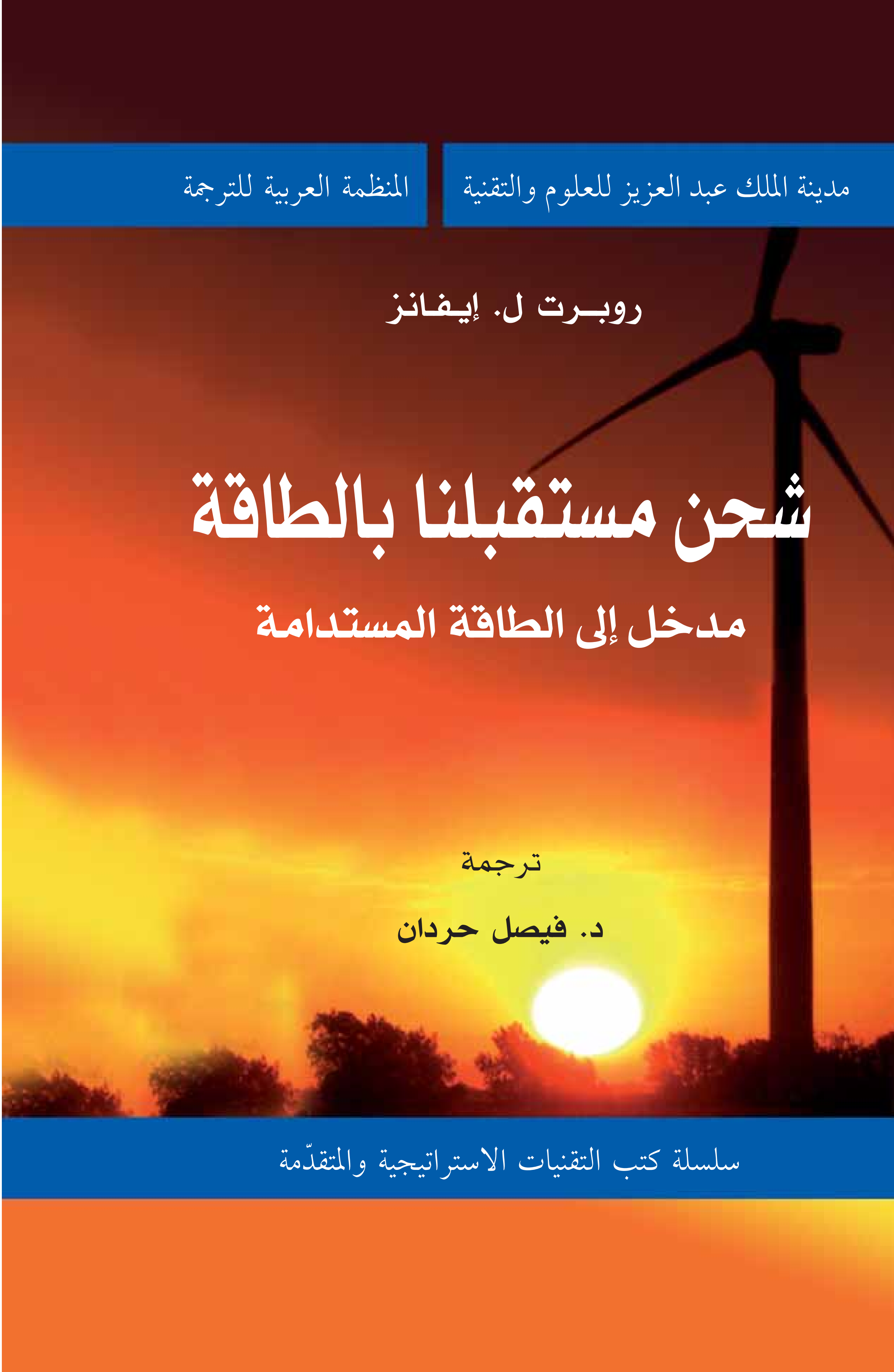


مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

المنظمة العربية للترجمة

روبرت ل. إيفانز

شحن مستقبلنا بالطاقة

مدخل إلى الطاقة المستدامة

ترجمة

د. فيصل حردان

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

شحن مستقبلنا بالطاقة

المنظمة العربية للترجمة

روبرت ايفن

شحن مستقبلنا بالطاقة

ترجمة: فيصل حردان

مراجعة: د. إبراهيم رشيدي

الفهرسة أثناء النشر ـ إعداد المنظمة العربية للترجمة

شحن مستقبلنا بالطاقة/ ؛ ترجمة . مراجعة
٣١٢ ص.
ببليوغرافية: ص ـ .
يشتمل على فهرس
ISBN 9-4-0-1
١ . . ٢ . ة.
أ. العنوان. ب. (مترجم). ج. ، محمد (مراجع).
3؟؟؟؟

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تعبّر بالضرورة
عن اتجاهات تتبناها المنظمة العربية للترجمة»

المنظمة العربية للترجمة

بناية «بيت النهضة» شارع البصرة، ص.ب: ٥٩٩٦ ـ ١١٣
الحمراء ـ بيروت ٢٠٩٠ ١١٠٣ ـ لبنان
هاتف: ٧٥٣٠٣١ (٩٦١١)/ فاكس: ٧٥٣٠٣٢ (٩٦١١)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية
بناية «بيت النهضة» شارع البصرة ص.ب: ٦٠٠١ ـ ١١٣
الحمراء ـ بيروت ٢٤٠٧ ٢٠٣٤ ـ لبنان
تلفون: ٧٥٠٠٨٤ ـ ٧٥٠٠٨٥ ـ ٧٥٠٠٨٦ (٩٦١١)
برقياً: «مرعربي» ـ بيروت/ فاكس: ٧٥٠٠٨٨ (٩٦١١)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، كانون الثاني/ يناير ٢٠١١

المحتويات

القسم الثالث
مصادر الطاقة المُستدامة والجديدة

قائمة الأشكال

تقديـــم

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية
مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني، ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة ويقع في إطار تلبية عدد من السياسات والتوصيات التي تعنى باللغة العربية والعلوم ومنها:

أولاً: البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ 2007م الذي يؤكد ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات حيث نص على ما يلي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت وغيرها).

ثانياً: «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق عنها اعتماد إحدى عشرة تقنية إستراتيجية هي: المياه، والبترول والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر (النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات والاتصالات والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

ثالثاً: مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تفعِّل أيضاً ما جاء في البند أولاً عن حضور اللغة العربية في الإنترنت، حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدد من المشاريع التي تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على شبكة الإنترنت، ومنها ما يتعلق بترجمة الكتب الهامة، وبخاصة العلمية، مما

يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كل من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون الأول مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون الثاني كتاباً جامعياً، والثالث كتاباً عاماً موجهاً إلى عامّة المهتمين، وقد يغطي ذلك كتاب واحد أو أكثر. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثون كتاباً مترجماً، كما خصص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

ولقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير منها أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يشهد لهم عالمياً، وأنه قد صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيِّق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي ألّف بها الكتاب وليست مترجمة عن لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصبّ في جهود نقل التقنية والابتكار ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأود أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على إنجازها في المنظمة وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

الرياض 20/ 3/ 1431 هـ

رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

د. محمد بن إبراهيم السويل

مقدمــة الكتــاب

يعتبر استخدام الطاقة وتأثيرها في البيئة أحد أهم القضايا التقنية والاجتماعية ذات السياسة العامة التي تواجه الجنس البشري اليوم. هناك نشاط بحثي كبير والعديد من النشريات التي تتطرق لهذه القضايا، بعض منها يرسم لوحة تشاؤمية لأجيال المستقبل، بينما يشير البعض الآخر إلى مستقبل لامع عبر استخدام تكنولوجيات جديدة أو تنفيذ سياسات جديدة. وعلى الرغم من الاستمرار بانجاز أعمال مُمتازة عديدة، إلا إن معظم البحوث تميل بالضرورة إلى أن تكون موضوعية ضمن نطاق ضيّق. ولذلك فإن الحلول لهذه المشاكل الناتجة من الأنماط الحالية لاستخدام الطاقة غالباً ما تبدو (نوعاً ما) أنه تم التعامل معها جزءاً بجزء في أي مكان، وإنه من الصعب لمتّخذي القرار ومستهلكي الطاقة أن يشاهدوا «الصورة الكبيرة» التي يتم الحاجة إليها حقاً، لفهم وتصميم منشآت طاقة مستدامة حقيقية.

يتبنّى هذا الكتاب منهجية نظامية لاستخدام الطاقة بحيث يمكن مشاهدة النتائج الكاملة عند اختيار مصدر طاقة معين أو نظام معين لتحويل الطاقة. هنا يتم تقديم فكرة السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة، التي تعتبر بسيطة لكنها أداة قوية من أجل تحليل أي عملية استهلاك للطاقة، ولتربط منابع الطاقة الأولية من البداية حتى نقطة الاستهلاك النهائية. عند النظر إلى النتائج الكاملة لأي تكنولوجيا طاقة مُقترحة بهذه الطريقة يصبح القارئ قادراً على رؤية لماذا تكون بعض الحلول المقترحة أكثر استدامة من حلول أخرى، وكيف يمكن كسر الصلة بين

استهلاك الطاقة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وتعتبر هذه الطريقة النظامية والبسيطة أساسية لتوفير فهم شامل لكيفية تمكننا من البدء بالانتقال إلى مستقبل طاقة نظيفة ومُستدامة بشكل حقيقي. بعدئذٍ يتم تلخيص العواقب البيئية لاستهلاك الطاقة وأنماط استخدامها الحالية ما يزوّد الأرضية الضرورية لفهم امتداد وتعقيد المسألة. تُظهر الفصول اللاحقة معالم استخدام التقنيات الحديثة الحالية في تكنولوجيا الطاقة المُستدامة متضمنةً الوقود الأحفوري غير التقليدي ومصادر الطاقة المتجددة، والطاقة النووية. سيتم التطرّق ببعض التفصيل إلى المشاكل الصعبة لتطوير نظام طاقة أكثر استدامة لأغراض النقل، مع تركيز خاص على المَركبات الطرقية. أخيراً، تمَ وضع بعض الاستقراءات حول كيفية تحقيق توازن طاقة عالمي مُستدام على امتداد بقية هذا القرن. ويُؤمل أن يكون هذا الكتاب قيّماً ومصدراً لإثارة الفكر ليس فقط لمُمارسي مهنة ذات صلة بالطاقة وللطلاب، ولكن أيضاً من أجل مُتّخذي القرار وعامة الناس المُهتمين ككل.

مصطلحات مهمة

البرميل Barrel

يمكن قياس مقدار النفط الخام بالكتلة (طن)، أو بالحجم (متر مكعب، أو برميل). يساوي البرميل الواحد 35 (Bbl) غالون بريطاني (Imperial Gallon)، أو 42 غالون أميركي (US gallon). ويساوي الطن الواحد من النفط 7.35 برميل تقريباً.

الكفاءة Efficiency

تُعرف كفاءة أي نظام تحويل للطاقة بأنها نسبة طاقة أو عمل الخرج للنظام إلى طاقة الدخل. تستعمل عادةً «الكفاءة الحرارية» لوصف أداء «محرّك حراري» (Heat Engine)، حيث تُستعمل فيه الطاقة الحرارية أو الكيميائية لإنتاج شغل ما.

الطاقة Energy

يمكن تعريف الطاقة بأنها «مَقدرة للقيام بشغل»، واستُعملت لها وحدات مختلفة كثيرة. يمكن تواجد الطاقة بأشكال مختلفة كثيرة، مُتضمّنةً الطاقة الكيميائية كتلك المُحتواة بالوقود الأحفوري، والطاقة الحرارية التي يمكن أن تعود إلى الشغل الذي يمكن أن يُبذل كنتيجة للفرق في درجة الحرارة بين مادتين. أما الطاقة الكهربائية فهي شكل من أشكال الطاقة يتم فيها استعمال تدفّق الإلكترونات لإنجاز شغل بواسطة محرك كهربائي، أو لتزويد حرارة من شبكة مقاومات كهربائية.

إن الوحدة الأساسية للطاقة في النظام الدولي للوحدات (SI)

هي الجول (Joule, J)، حيث إن جول واحد يساوي الطاقة المطلوبة للقيام بنيوتن- متر واحد من الشغل(*). في نظام الوحدات البريطاني الذي لا يزال مُستخدماً في بلدان كثيرة تتكلم الإنجليزية (بخاصة الولايات المُتحدة الأميركية)، إن الوحدة الأساسية للشغل هي الباوند(**)- قدم (lb-ft)، والوحدة الأساسية للطاقة هي الوحدة الحرارية البريطانية (British thermal unit - Btu). حيث إن (Btu) واحد يمثّل الطاقة المطلوبة لتسخين باوند من الماء درجة فهرنهايتية واحدة. يبيّن المُكافئ الميكانيكي للحرارة أن 778 باوند - قدم من الشغل تكافئ (Btu) واحد. يمكن تبسيط التحويل بين نظامي الوحدات السابقين بملاحظة أن (Btu) واحد يكافئ 1055 جول.

بما إن الجول يمثّل مقداراً صغير جداً للطاقة، فإن القيم تُعطى غالباً بعبارات من مضاعفات الألف. مثلاً:

1 كيلو جول (1 kJ) =	10^{3} جول
1 ميغا جول (1 MJ) =	10^{6} جول
1 جيغا جول (1 GJ) =	10^{9} جول
1 تيرا جول (1 TJ) =	10^{12} جول
1 بيتا جول (1 PJ) =	10^{15} جول
1 إكسا جول (1 EJ) =	10^{18} جول

في نظام الوحدات البريطانية، من الشائع استخدام «ملايين الوحدات الحرارية البريطانية (Btu) حيث إن:

(*) هذا الشغل ينشأ عن تطبيق قوة واحد نيوتن على نقطة معينة عندما تتحرك هذه النقطة مسافة متر واحد باتجاه القوة المطبقة.

الهوامش المشار إليها بـ (*) هي من وضع المترجم

(**) الباوند ويساوي 453.6 غرام.

1 مليون MMBtu = 10^6 (Btu) (وحدة حرارية بريطانية).

بما إن الوقود الأحفوري، وخصوصاً النفط الخام، يُمثّل الجزء الأكبر من مجمل الطاقة المُستهلكة في البلاد الصناعية، فإن استهلاك الطاقة الكلّي يُعطى أيضاً في بعض الأحيان «بأطنان نفط مُكافئة» (Tonnes of Oil Equivalent) أو باختصار (toe). بمعنى آخر، كل استهلاك الطاقة يُحوّل إلى طاقة مُكافئة محتواة في عدد محدّد من أطنان النفط الخام. هناك عامل تحويل مُفيد يعطى كالآتي:

كل واحد طن نفط مكافىء (toe) يساوي 41.87 جيغا جول

1 (toe) = 41.87 (GJ)

من أجل كميات كبيرة من استهلاك الطاقة، تُستخدم من جديد مضاعفات الألف. مثلاً:

1 مليون طن نفط مكافئ (1 Mtoe) = 10^6 طن نفط مكافىء (toe)

1 جيغا طن نفط مكافئ (1 Gtoe) = 10^9 طن نفط مكافىء (toe)

يُقاس عادة استهلاك الطاقة الكهربائية بكمية القدرة الكهربائية المُشغّلة في وحدة زمن. مثلاً، إن الوحدة الأساسية للطاقة الكهربائية المُستعملة لدى شركات الكهرباء هي قدرة كيلو واط 1(kW) واحد فاعلةً لمدة ساعة 1(h)، أو كيلو واط ساعة (1kWh). ونتيجةً لذلك:

1 كيلو واط ساعة (1 kWh) = 10^3 واط ساعة

1 ميغا واط ساعة (1 MWh) = 10^6 واط ساعة

1 جيغا واط ساعة (1 GWh) = 10^9 واط ساعة

القدرة Power

تُعرَّف القدرة بأنها «مُعدّل بذل الشغل»، أو بشكل مُكافئ «مُعدّل استهلاك الطاقة». إن الوحدة الأساسية للقدرة في نظام (SI) للوحدات هي الواط (W)، والتي تُعرَّف على أنها القدرة المنتجة عندما يُستهلك واحد جول خلال ثانية واحدة. أما الواط فيساوي واحد جول/ ثانية. مرةً أخرى، يتم استخدام مضاعفات الألف لقياس كميات أكبر من القدرة. مثلاً:

1 كيلو واط	(1 kW) =	10^3 واط
1 ميغا واط	(1 MW) =	10^6 واط
1 جيغا واط	(1 GW) =	10^9 واط

يُميّز المُهندسون الذين يصمّمون ويشغّلون محطات الطاقة الحرارية في بعض الأحيان بين «الطاقة الكهربائية» باستخدام الحرف "e" و«الطاقة الحرارية» باستخدام الحرف (t). مثلاً، يمكن أن تُولّد محطة كبيرة للطاقة تعمل على حرق الفحم 2000 ميغا واط كهربائية (2000 MWe) من القدرة الكهربائية، بينما تستهلك فحم بمعدل 6000 ميغا واط حرارية (6000 MWt)، مُؤدّيةً إلى «كفاءة حرارية» تساوي 33.3 في المئة.

يوجد في الملحق قائمة أكثر شمولاً لتحويل وحدات الطاقة.

القسم الأول

معلومـات تمهيديـة

1 ـ مقدمة

يعتبر التزوّد بمصادر طاقة نظيفة ومستدامة لتلبي حاجاتنا المتنامية دوماً أحد أكثر التحدّيات المتأزّمة التي تواجه الجنس البشري في بداية القرن الواحد والعشرين. ويصبح واضحاً بشكل متزايد أن الطرق التقليدية التي أشبعنا فيها رغبتنا الكبيرة والمتنامية للطاقة من أجل تدفئة منازلنا وتشغيل صناعاتنا وتزويد نظم النقل لدينا بالوقود، ليست مستدامة. وتعود هذه النتيجة جزئياً إلى الدليل المتزايد بأن الانبعاثات الناتجة من استهلاك الوقود الأحفوري تؤدّي إلى تغيّر المناخ الأرضي، بالإضافة إلى كونها مسؤولة عن تلوّث الهواء المحلي. وتعود أيضاً إلى الإدراك بأننا نستنفد وبسرعة المخزون العالمي للوقود الأحفوري، وأن المصادر التي تحل محل هذا الوقود يصبح إيجادها وإنتاجها أكثر وأكثر صعوبةً. حتى إن المشكلة أصبحت أشد بسبب الشراهة الكبيرة والمتنامية سريعاً للطاقة في الدول المتنامية، إذ تخضع العديد من الدول لمُعدلات نمو اقتصادية بشكل عال جداً، ما يؤدي إلى الطلب العالي لمصادر طاقة جديدة. في الصين، مثلاً، تنامى الطلب الإجمالي على الطاقة بمعدل سنوي 4 في المئة في السنوات الأخيرة، بينما تنامى الطلب في الهند بمعدل 6 في المئة، مُقارنةً بمعدل دون 2 في المئة بقليل لبقية العالم.

إن تغيّر مناخ الكرة الأرضية، وبالأخص موضوع الاحتباس الحراري، قد سلّط الضوء على شراهتنا الكبيرة للوقود الأحفوري. وعلى الرغم من أن هناك جدالاً كبيراً حول توسع المشكلة، إلا أنه ليس هناك شك في أن تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في

الغلاف الجوي، أحد «غازات الاحتباس الحراري» الرئيسة، يتزايد باستمرار، وعلى الأرجح يعود ذلك إلى نشاطات الجنس البشري على الأرض، أو إلى أسباب متعلقة بالنشاط الإنساني (Anthropogenic) عموماً. إن استهلاك أي وقود أحفوري يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وتشير معظم الدلائل العلمية بأن استخدام هذا الوقود السبب الرئيس في تزايد مُستويات تركيز CO_2 في الغلاف الجوي، وفي الازدياد الضئيل (ولكن المهم) في متوسط درجات الحرارة على الأرض. لقد بَيّنت الدراسات التي أجرتها «اللجنة الدولية للأمم المتحدة من أجل تغير المناخ» (The United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC)، أن تركيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي قد ارتفع من مُستوى حوالى 280 جزءاً في المليون في الحقبة ما قبل الصناعية إلى 370 جزءاً في المليون في يومنا هذا، مع أن مُعظم التزايد ظهر في المئتي سنة الأخيرة. ويبدو أن متوسط درجة حرارة الأرض خلال هذه الفترة قد ارتفع بحوالى درجة مئوية واحدة (1°C)، مع أن معظم هذا الارتفاع ظهر في المئة سنة الأخيرة أو قريباً من ذلك. وقد توقعت النمذجة الحاسوبية للغلاف الجوي المنجزة بواسطة علماء (IPCC) الذين استخدموا عدداً من السيناريوهات لمستقبل استهلاك الطاقة، أنه على مدى المئة سنة التالية يمكن أن يرتفع تركيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي لمُستوى ما بين 540 و970 جزءاً بالمليون، مع ارتفاع ناتج في متوسط درجة حرارة الأرض بين 1.4°C (حد أدنى) إلى مستوى 5.8°C (حد أعلى). طالما أن الجنس البشري يمكن أن يكون قادراً على التكيّف بسهولة مع التغيرات الصغيرة نسبياً في المناخ التي يمكن أن تنتج من الحد الأدنى التقديري لارتفاع درجة الحرارة، فإنه عند الحد الأعلى، ومن المُحتمل أن تحصل تغيرات مهمة وواسعة الانتشار، مُتضمنةً ارتفاعاً واضحاً في مستوى البحار حول العالم بسبب ذوبان الغطاءات الجليدية القطبية وتمدّد المياه الأدفأ في

المحيط. ومن المُحتمل أن يحصل أيضاً ازدياد في التصحّر عند الحد الأعلى، بشكل خاص في المناطق القريبة من خط الاستواء، وازدياد في تقلبات نماذج الطقس العالمي. بالطبع، يتسبب أيضاً الاعتماد الواسع الانتشار على الوقود الأحفوري بتأثيرات محلية مهمة، على شكل مستويات زائدة في تلوث الهواء، وبشكل أوّلي في الأماكن المأهولة الكبيرة وفي المراكز الصناعية حيث انبعاث أكاسيد الآزوت والمُركّبات الكربوهيدراتية غير المحترقة وأول أكسيد الكربون يؤدي إلى تشكل الضباب الدخاني (Smog). يمكن أن تؤدي هذه التأثيرات المحلية إلى آثار صحية خطيرة، بالإضافة إلى عدم وضوح الرؤية في المناطق المعرضة لها.

عندما يُدرس بالتفصيل استهلاك الطاقة في أي قطاع اقتصادي، فإن الاستهلاك النهائي يمكن دوماً أن يُرَدّ إلى واحد أو أكثر من مصادر الطاقة الأولية الثلاث: الوقود الأحفوري، الطاقة المتجددة، أو الطاقة النووية. ولكي نفهم الانعكاس الكامل لتغيرات نموذج استهلاكنا الحالي للطاقة، من الضروري أن نأخذ بعين الاعتبار تأثيرات أي تغيرات مقترحة في النظام الكامل للطاقة من مصدرها الأوّلي وخلال تحولاتها حتى طرف الاستهلاك الأخير. تدعى هذه الطريقة في بعض الأحيان بطريقة «مصدر- إلى- عجلات» (Well-to-Wheels)، بالرجوع إلى مصدر الطاقة الكامل ونموذج الاستهلاك النهائي المُترافق مع تزويد طاقة الوقود الأحفوري إلى المركبات. ويمكن استخدام نوع تقدير الحالة نفسه في دراسة أي نظام طاقة، بالأخذ بالحسبان «سلسلة تحويل الطاقة» التي تربط المصادر الأوّلية للطاقة مع «حوامل» الطاقة مثل منتجات النفط المكرّر والكهرباء، وخلال التحولات حتى موقع الاستهلاك النهائي في القطاعات الصناعية، التجارية، السكنية، أو قطاع النقل. وقد تم استخدام هذه الطريقة، التي ستُوضّح بتفصيل أكثر في الفصل التالي، في كافة أجزاء هذا الكتاب لتقدم تحليلاً لكل الخطوات المطلوبة في

تحويل مصدر الطاقة الأوّلي إلى شكل استهلاكه الأخير. في هذه الطريقة، يتم الأخذ بالحسبان مجمل فَقْد الطاقة والانبعاثات المُلوّثة، المُلازمة لكل مرحلة من مراحل التَحول، بحيث يمكن الحصول على دراسة تقديرية كاملة لنظام الطاقة ككل. وقد أدّت الحاجة إلى تحقيق مصدر عالمي أكثر استدامة للطاقة، بدون خطورة تغيّر بالمناخ غير قابل للتصحيح، أو الأخطار الصحية المُترافقة مع تلوّث الجو المحلي، إلى اقتراحات كثيرة لتحسين النماذج الحالية لاستهلاك الطاقة. إلا أن الحلول التي يتم طرحها لتتناول أحد جوانب السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة فقط، لا تتطرق غالباً بطريقة عملية إلى الحاجة إلى تأسيس نظام مُستدام بشكل حقيقي لإنتاج واستثمار الطاقة. وكما سنرى في الفصول اللاحقة، يبدو هذا الأمر حقيقةً في ما يخص «الاقتصاد الهيدروجيني» (Hydrogen Economy) المزعوم الذي يُعدّ بأنه «خالٍ من الكربون» عند نقطة الاستهلاك النهائية، لكنه يمكن أن لا يكون مُناسباً إذا تم تحليل السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة بالتفصيل من المصدر الأوّلي حتى الاستهلاك النهائي. وبتحليل السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة من أجل أي تغيرات مقترحة للنماذج الحالية في استهلاك الطاقة، نستطيع بشكل أكثر ثباتاً أن نرى الدرجة الكاملة للاستدامة (Sustainability) التي من الممكن أن تُوفّرها مثل هذه التغيرات.

إن الطلب العالمي المتنامي على الطاقة بكافة أشكالها يضغط بشكل طبيعي على المصادر المتناقصة للوقود الأحفوري التقليدي، بشكل خاص النفط الخام والغاز الطبيعي. وتُبيّن شركات الطاقة العالمية التي تُنقّب عن النفط الخام وتنتج النفط والغاز الطبيعي أن هناك مَسعى أكبر وكلفة أكبر مطلوبتان للمُحافظة على المستويات التقليدية من «المخزون إلى الإنتاج». وقد جهدت هذه الشركات للحفاظ على نسبة مخزون إلى إنتاج (R/P) بالنسبة إلى النفط الخام عند قيمة حوالى 40 سنة، وبالنسبة إلى الغاز الطبيعي عند قيمة

حوالى 70 سنة. وقد تم اكتشاف عدد قليل من حقول إنتاج جديدة رئيسة، في السنوات القليلة الماضية، كما ازدادت بشكل كبير مساعي الاستكشاف والكلفة المطلوبتين للحفاظ على هذه النسب. بالطبع، وبشكل مؤكد، سوف تنضب مصادر النفط والغاز الطبيعي إلى هذه الدرجة، أو سوف تصبح كلفة الإنتاج عالية جداً، بحيث إن مصادر الطاقة البديلة سوف تحتاج إلى التطوير. في بعض المناطق من العالم يستمر تطوير إنتاج جديد من مصادر النفط غير التقليدية مثل رواسب النفط الثقيل والرمال النفطية لإنتاج النفط الصناعي (Synthetic)، الذي سوف يكون قادراً على إطالة فترة التزوّد بالنفط الخام التقليدي.

يتوافر الفحم الحجري بكميات أكبر بكثير من كميات النفط الخام والغاز الطبيعي، وبنسبة مخزون إلى إنتاج أعلى بكثير، حيث إنها حالياً بمرتبة 200 سنة. وهذه النسبة هي كبيرة بشكل كاف لتحول دون التوسع في استكشاف المزيد من مخزونات جديدة للفحم الحجري، على الرغم من أنها بدون شك مُتوافرة. غير أن التحديات الناجمة عن استخدام الفحم الحجري بطريقة مقبولة بيئياً ومن أجل تطبيقات غير توليد الكهرباء بقدرات كبيرة، هي في حالة بحيث يبقى الفحم الحجري تحت مستوى الاستخدام الفعلي.

لقد أدّى القلق المتزايد حول التوفر طويل الأمد للنفط الخام والغاز الطبيعي، وحول انبعاث غازات الاحتباس الحراري والملوّثات من الوقود الأحفوري إلى الاهتمام المتزايد في استخدام الفحم الحجري لإنتاج كلٍ من الوقود الغازي والسائل. تاريخياً، استخدم الفحم الحجري لصناعة «الوقود الغازي» (Producer Gas)(*) قبل التوفر الواسع الانتشار للغاز الطبيعي، وقد تم أيضاً تطوير عمليات لتحويل الفحم الحجري إلى أشكال صناعية من وقود الغازولين

(*) وقود منخفض الجودة مؤلف بشكل رئيس من أول أكسيد الكربون والآزوت، يتم تشكيله بإمرار الهواء أو الهواء والبخار عبر جمر الفحم.

والديزل. وينحصر الإنتاج التجاري للوقود السائل من الفحم الحجري في الوقت الحالي بجنوب أفريقيا، لكن بدأت الآن بلدان أخرى مُنتجة للفحم الحجري بدراسة هذه العملية كخيار محتمل ليحل محل إنتاج الوقود السائل المُشتق من النفط الخام. بالطبع إن الاستثمار الأكبر للفحم الحجري بهذه الطريقة، أو لإنتاج الغاز الطبيعي الصناعي، سوف يؤدي إلى انبعاث زائد لغازات الدفيئة والملوّثات الأخرى. كنتيجة لذلك، هناك أعمال بحث وتطوير متزايدة تجري الآن على التقنيات المعروفة «بحجز وتخزين الكربون» (Carbon Capture and Storage) أو (Carbon Sequestration). وتوجد طرق عدة مُقترحة من أجل فصل غاز CO_2 الناتج عن احتراق الفحم، أو تحويله إلى سائل تركيبي أو وقود غازي، لتخزين أو «عزل» هذا الغاز بطريقة بحيث لا يدخل الغلاف الجوي كغاز دفيء. وحتى الآن ما زالت الاقتراحات في مرحلة مُبكّرة وخاصةً من أجل مرحلة فصل غاز CO_2 الصعبة، لكن هناك عدة دراسات تجريبية للتحقّق من التخزين الطويل الأمد لغاز CO_2 في آبار النفط والغاز المُستهلكة. هناك أيضاً دراسات أخرى في طور الظهور لجدوى تخزين كميات كبيرة من غاز CO_2 في المُحيطات العميقة، لكن هذه الدراسات هي في مرحلة مُبكّرة كثيراً من التطوّر. إذا أمكن البرهان على أن عمليات الحجز والتخزين الطويلة الأمد لغاز CO_2 بالطريقة أعلاه هي ذات جدوى فنية واقتصادية، عندها يمكن تأمين طريقة لتوسيع استخدام المخزونات الكبيرة جداً للفحم الحجري حول العالم، بدون قلق مُفرط حول إنتاج غازات الدفيئة.

تتكون مُعظم مصادرنا الأولية للطاقة في الوقت الحالي من وقود أحفوري غير مُتجدد، حيث إن 80 في المئة تقريباً من الطلب العالمي على الطاقة مُزوّد من النفط الخام والغاز الطبيعي والفحم الحجري. سوف يؤدي نموذج أكثر استدامة للتزوّد بالطاقة والاستهلاك النهائي في المستقبل (بشكل لا مناص منه) إلى الحاجة إلى الاستخدام الأكثر

لمصادر الطاقة المتجدّدة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية، بالإضافة إلى الطاقة الجيوحرارية والطاقة النووية التي يعتبرها كثير من الناس على أنها مستدامة، على الأقل بالنسبة إلى المستقبل الملحوظ. وقد أظهرت دراسات عديدة أن هناك بالتأكيد طاقة أوّلية كافية ومتوافرة من مصادر متجددة لتزوّد كل احتياجاتنا بالطاقة. وتتميز مُعظم مصادر الطاقة المتجددة «بكثافة طاقة» أقل بكثير مما اعتدنا عليه، وهذا يعني أن مساحات أرض كبيرة، أو تجهيزات بأحجام كبيرة (وفي بعض الأحيان كلتيهما)، مطلوبة لتحل مكان استخدام الوقود الأحفوري إلى حد معقول. وهذا بدوره يعني أن الطاقة المُنتَجة عند طرف الاستهلاك من مصادر الطاقة المتجددة تميل لأن تكون أعلى كلفةً من الطاقة الناتجة من الوقود الأحفوري، على الرغم من أن الطاقة الأوّلية(*) مجانية. وتبدأ هذه الكلفة بالتغير في بعض الحالات لأن أسعار الوقود الأحفوري تستمر بالازدياد، وكلفة بعض مصادر الطاقة المُتجددة، كطاقة الرياح، تتناقص بسبب التكنولوجيا المُتطوّرة والوفر الاقتصادي المكتسب مع استخدام نظم أكثر/ أكبر لهذه المصادر. تظهر اعتبارات أخرى مع استخدام الطاقة المتجددة عائدة إلى طبيعتها المُتقطّعة من ناحية، ومن ناحية أخرى إلى تأثير المنشآت الضخمة المتعلقة بها، بشكل خاص في الأماكن التي تمتلك جمالاً طبيعياً بارزاً أو أينما يكون هناك اعتبارات بيئية.

يقترح بعض المُراقبين فكرة توسيع انتشار الطاقة النووية كطريقة لضمان أن لدينا مصادر كافية لكهرباء نظيفة وذات ناتج كربوني مُنخفض للأجيال العديدة القادمة. وعلى الرغم من أن الطاقة النووية تساهم حالياً بنسبة 7 في المئة تقريباً من مجمل مصادر الطاقة الأولية العالمية، إلا أن هناك حماسة ضئيلة من أجل زيادة القدرة العُظمى النووية في السنوات الأخيرة. ويبدو أن غياب الحماسة العامة للطاقة

(*) وتعني هنا الطاقة الطبيعية المجانية مثل طاقة الشمس، الرياح... إلخ.

النووية ناتج بشكل أوّلي من الكلفة الأعلى لإنتاج الكهرباء من الطاقة النووية مقارنةً بما كان مُتوقعاً، بالإضافة إلى اعتبارات الأمان النووي والتخلص من النفايات النووية واحتمال انتشار الأسلحة النووية. وقد بَيّنت الصناعة النووية أن المنشآت النووية تستطيع العمل بدرجة عالية من الأمان والموثوقية، ولا زالت الصناعة تقوم بتطوير أنواع من المُفاعلات مبنية من وحدات مُستقلة يمكن أن تكون أكثر اقتصادية من التصاميم الأصلية التي يعود كثيرٌ منها إلى خمسينيات وستينيات القرن الماضي. ولا تزال هناك منشآت نووية جديدة تُبنى في بلاد ذات مُعدلات نمو عالية جداً للطلب على الطاقة، مثل الصين والهند، وتبدأ أيضاً شركات الكهرباء في العالم المُتطوّر بإعادة النظر بمواقفها من بناء منشآت نووية جديدة. ولن يكون هناك شك بوجود مُناظرات نشطة في بلدان عديدة قبل تبنّي موضوع توسيع انتشار الطاقة النووية، لكنها تبقى أحد المصادر القليلة لإنتاج الكهرباء بقدرات كبيرة من دون إصدار الكربون، التي يمكن استخدامها لتخفيض إنتاج غازات الدفيئة بشكل جوهري. ومن الممكن أن تزداد الحاجة إلى مثل هذه المنشآت النووية إذا غيرت بعض القطاعات التي تعتمد على الوقود الأحفوري بشكل تقليدي، كقطاع النقل، توجهها إلى الاعتماد على الكهرباء كحامل للطاقة ما يؤدي بالضرورة إلى توسع مهم في السعة الاستطاعية لتوليد الكهرباء.

يساهم قطاع النقل بأكثر من الربع قليلاً في الطلب العالمي على الطاقة، وهو واحد من أكثر القطاعات تحدياً في استهلاك الطاقة من وجهة نظر تخفيض الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتخفيض انبعاثات غازات الدفيئة وملوّثات أخرى. يعود ذلك إلى أن الوقود المحبّذ من أجل تطبيقات النقل هو البنزين أو الديزل على الأغلب، وبسبب سهولة التخزين على متن مَركبات النقل، وطبيعة انتشار محرّك الاحتراق الداخلي الذي قد طُوّر بشكل كبير لأكثر من مئة سنة من أجل هذه التطبيقات. وعلى الرغم من أنه قد تم تقديم اقتراحات

لحجز وتخزين غاز CO_2 المُحرّر خلال احتراق الوقود الأحفوري في المنشآت الثابتة، إلا أن ذلك ليس حلاً قابلاً للتطوّر بالنسبة إلى المَركبات المُتحرّكة إجمالاً. لقد تم اقتراح الهيدروجين كبديل مثالي للوقود الأحفوري في قطاع النقل، وكوقود لمحركات الاحتراق الداخلي المُستخدم الآن في كل مكان، أو لتوليد الكهرباء بواسطة «خلايا الوقود»، على متن المَركبات. وسوف يؤدي استخدام الهيدروجين في هاتين الطريقتين إلى انبعاثات قريبة من الصفر من هذه المَركبات لكل من غازات الدفيئة والملوّثات الأخرى، وقد عُدّ ذلك خطوة مهمة في تطوير «الاقتصاد الهيدروجيني». إذا نظرنا إلى السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة، فإنه من الواضح أن الهيدروجين هو في هذه الحالة حامل للطاقة فقط وسوف يأتي بالضرورة من مصدر أوّلي للطاقة، إما من الوقود الأحفوري، أو من مصادر مُتجددة أو نووية، تستخدم الكهرباء كحامل وسيط للطاقة. ولن يؤدي استخدام الطاقة المُتجددة والنووية كمصدر أوّلي إلى أي انبعاثات خلال الدورة الكاملة للطاقة، لكن الكفاءة الكلية لتحويل الطاقة سوف تكون مُنخفضة جداً، ما يتطلب توسعاً كبيراً لشبكة التوليد الكهربائية. ويمكن أن يكون هناك حل بديل بكفاءة إجمالية للطاقة أعلى بكثير وكلفة أقل وذلك بالتطوير الناجح للمَركبات الكهربائية الهجينة المرتبطة مع الشبكة الكهربائية (Grid-connected) أو ذات مقبس كهربائي (Plug-in)، والتي تستخدم مُدّخرات كهروكيميائية (بطاريات) يتم شحنها من الشبكة لتجهيز الطاقة الدافعة للرحلات القصيرة، أو محرّك/ مولّد صغير لإعادة شحن المُدّخرات إذا كان المطلوب مسافات أطول. سوف نبحث في فصل لاحق السيناريوهات البديلة لطاقة وسائل النقل باستخدام طريقة سلسلة تحويل الطاقة.

يمكن توضيح «مشكلة الطاقة» بالقول إن تأمين مصدر غير ملوّث ومُستدام للطاقة ليلبي جميع حاجاتنا المنزلية والتجارية والصناعية هو تحدٍّ معقّد وطويل الأمد من أجل المجتمع. لحسن الحظ، إن الإنسان

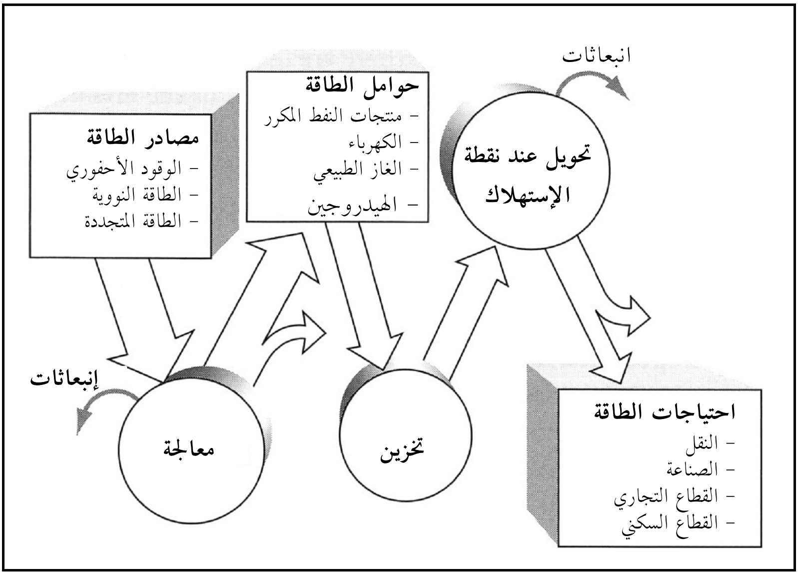
بطبيعته كائن قادر على حل المشاكل، وهناك حلول محتملة كثيرة يمكن بواسطتها جعل مصادر طاقة المستقبل مستدامة من أجل أجيال المستقبل. ويُعتبر البحث عن هذه الحلول بطبيعته نشاطاً متعدد المعرفة (Multidisciplinary)، ويتطلب جوانب عديدة من العلوم والهندسة والاقتصاد، بالإضافة إلى العلوم الاجتماعية. يميل أيضاً تطور هذه الحلول إلى أن يكون على مدى طويل حوالى 10، 20، أو حتى 50 سنة تقريباً، وبالتالي إلى أمد أطول بكثير من الإطار الزمني الذي يفكر فيه مُعظم السياسيين ومتّخذي القرار. بالتالي يجب علينا أن نطوّر طرقاً جديدة طويلة الأمد في التفكير الاستراتيجي والتخطيط، ونكون متأكدين من أن بعض أفضل العقول، ذات مقدرات ومهارات واسعة، يتوجب تزويدها بالأدوات للقيام بهذا العمل.

يُلخّص هذا الكتاب التطوّرات الحالية في الموازنة بين الطلب على الطاقة والمخزون ويحاول تقديم بعض الفهم العميق لقليل من السيناريوهات المُمكنة والعديدة لبناء مستقبل طاقة طويل الأمد ومُستدام بشكل حقيقي. لا يستطيع أحد أن يُعطي «وصفة» (Recipe) من أجل استدامة الطاقة، لكن بالعمل مع بعضنا البعض عبر مجال واسع من فروع المعرفة نستطيع تحقيق تقدم حقيقي باتجاه التزوّد بمصدر طاقة آمن ونظيف ومضمون لأجيال عديدة قادمة.

2 ـ سلسلة تحويل الطاقة

في كل وقت نستهلك طاقة، إما لندفّئ منازلنا أو لنزوِّد سياراتنا بالوقود، نقوم بتحويل شكل من أشكال الطاقة إلى شكل آخر أو إلى عمل مُفيد. في حالة تدفئة المنزل نقوم بأخذ الطاقة الكيميائية المتوافرة في الغاز الطبيعي، أو الوقود النفطي، ونحوّلها إلى طاقة حرارية بواسطة حرق الوقود في مدافئ أو أفران. أو عندما نقود سياراتنا نستخدم المحرّك لتحويل الطاقة الكيميائية في البنزين إلى عمل ميكانيكي لتدوير عجلات السيارة. هذان مثالان فقط عن «سلسلة تحويل الطاقة» التي تطبّق دائماً عندما نستهلك الطاقة في منازلنا ومكاتبنا ومصانعنا، أو على الطريق. ونستطيع تصور السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة بأنها، في كل حالة، تتعقب تحويلات الطاقة الأوّلية من مصدرها وحتى الشكل الأخير للاستهلاك، مثل حالات التدفئة أو العمل الميكانيكي. وحينما نستهلك طاقة من المفروض أن نكون مُدركين بأنه يوجد سلسلة تحويل كاملة مُفعّلة، وليس فقط التركيز على نقطة الاستهلاك النهائية. للأسف، هناك العديد من الاقتراحات، لتغيير الطُرق التي نُزوّد بها الطاقة ونستهلكها، تأخذ بالحسبان فقط رؤية جزئية لسلسلة تحويل الطاقة، ولا تأخذ بعين الاعتبار التأثيرات أو الكلفة الناتجة من التغييرات المُقترحة على النظام الكلي لتزويد الطاقة. في هذا الفصل سوف نناقش عملية تحويل الطاقة بتفصيل أوسع، وسوف نُبيّن أن بعض «المصادر الجديدة» المقترحة للطاقة هي ليست مصادر بأي حال من الأحوال، وأنه يجب أن تأتي جميع الطاقة من عدد قليل فقط من المصادر الأوّلية للطاقة.

يبيّن الشكل (2-1) مخططاً لسلسلة متكاملة لتحويل الطاقة. وبإلقاء نظرة متفحصة نلاحظ أن هذه السلسلة تبدأ فقط بثلاثة مصادر أولية للطاقة، وتنتهي بتطبيقات قليلة عند طرف الاستهلاك النهائي مثل تدفئة المباني السكنية والتجارية، والنقل والعمليات الصناعية. وباعتبار هذا الواقع، فإن حاجتنا إلى الطاقة، التي يمكن أن تكون موزّعة دائماً على واحد من قطاعات الاستهلاك الأربعة، المبيّنة على أقصى اليمين في الشكل (2-1)، ترسو باتجاه نهاية سلسلة التحويل. وفي النهاية، يتم دائماً تزويد هذه الحاجة إلى الطاقة من أحد المصادر الأوّلية للطاقة المُدرجة على أقصى الطرف الأيسر من المُخطط بالشكل.



الشكل (2-1): سلسلة تحويل الطاقة

هناك عدد من المراحل بين المصدر الأوّلي وطرف الاستهلاك النهائي التي يتم خلالها تحويل المصدر الأوّلي إلى أشكال أخرى للطاقة، أو تخزينها للاستخدام في وقت لاحق. بأخذ مثال مألوف، نجد أنه لكي نقود سياراتنا نقوم باستعمال وقود أحفوري أو نفط خام

كمصدر أوّلي للطاقة. وقبل أن يُقدِّم هذا المصدر القوة المحركة الدافعة نحتاج أولاً إلى مُعالجة النفط الخام بتحويله إلى بنزين في مصفاة للنفط، كما هو مبيّن في المرحلة الثانية في الشكل (2-1). وتكون نتيجة هذه المرحلة من المُعالجة هي إنتاج شكل ثانوي للطاقة، أو ما يسمى عادةً «بحامل الطاقة». يوجد أيضاً خلال هذه المرحلة بعض فقدان للطاقة المتوافرة، كما هو مشار إليه بالسهم المُتفرع عن ذلك الذي يربط وحدة المعالجة بوحدة حوامل الطاقة. يوجد أيضاً حوامل للطاقة قليلة نسبياً، كما هو مُبيّن في المرحلة الثالثة من المخطط. وهي بشكل عام من مُنتجات نفطية مكرّرة (بنزين للسيارة مثلاً) وكهرباء، وغاز طبيعي، ومن المتوقع الهيدروجين. وعندما يتم تحويل المصدر الأوّلي إلى الحامل المُفضّل، يتم عادة تخزينه ليكون جاهزاً للاستخدام لاحقاً في المرحلة الأخيرة من تحويل الطاقة. في حالة سيارتنا، تم تخزين البنزين في خزان وقود السيارة ليكون جاهزاً للاستخدام بواسطة محرّك السيارة. عندما نُشغّل المحرّك ونقود السيارة تبدأ مباشرة المرحلة الأخيرة في سلسلة تحويل الطاقة. وهي مرحلة التحويل الأخيرة لطرف الاستهلاك التي يتم فيها تحويل الطاقة الكيميائية المُخزّنة في البنزين إلى عمل ميكانيكي بواسطة المحرّك الذي يُديّر العجلات. في هذه المرحلة يوجد عادةً فقدان كبير للطاقة المتوافرة بسبب الكفاءة الرديئة المُلازمة لمرحلة التحويل النهائية عند الاستهلاك، وهذا مُشار إليه أيضاً بواسطة السهم المُتفرّع عن هذه المرحلة. إذا كانت هذه المرحلة ممثلة لمحرك السيارة، مثلاً، فإن فَقْد الطاقة هذه يمكن أن يكون بحدود ثلثي الطاقة الموجودة في البنزين تقريباً. بالطبع هذا فقط مثال واحد. غير أن أي سيناريو لاستهلاك الطاقة يمكن دائماً أن يُتّبع من خلال سلسلة التحويل الكاملة المبيّنة في الشكل (2-1). وفي بعض الحالات، لا تكون جميع المراحل في السلسلة مطلوبة، لكن يمكن دائماً تَعقُب طاقة طرف الاستهلاك إلى الخلف باتجاه مصدر الطاقة الأوّلي. مثلاً،

وفي معظم الحالات عندما تكون الكهرباء هي حامل الطاقة فإنه يتم استهلاكها مباشرةً فور الإنتاج، ويعود ذلك إلى صعوبة تخزين الكهرباء إلى حد ما.

درس واحد لافت يمكن تعلّمه من الشكل (2–1)، وهو أنه يوجد ثلاثة مصادر أولية للطاقة: الوقود الأحفوري، الطاقة النووية، والطاقة المتجدّدة. يعني ذلك أنه في كل وقت نستعمل فيه أداة مُستهلكة للطاقة، سواء كانت سيارة أو فرناً منزلياً أو شاحن هاتف جوال، فإنه يمكن تعقّب سلسلة تحويل الطاقة بشكل تام إلى الوراء إلى واحد (أو أكثر) من هذه المصادر الرئيسة الثلاثة للطاقة الأوّلية. أيضاً، يوجد في عالمنا حالياً استعمال قليل جداً للطاقة المتجددة (باستثناء ملحوظ للطاقة المائية) كمصدر طاقة أوّلي، وهكذا نستطيع بشكل واقعي تقريباً أن نُرجع دائماً استهلاكنا للطاقة إلى الطاقة الأحفورية أو الطاقة النووية. وأخيراً بما أن الطاقة النووية تقدّم فقط جزءاً صغيراً من إجمالي الطاقة الكهربائية المُنتجة في يومنا هذا، فإن الطاقة الأحفورية تبقى بدون شك المصدر الأكثر أهمية كطاقة أوّلية. يمكن تجزئة الوقود الأحفوري إلى ثلاثة أصناف جزئية رئيسة: الفحم الحجري، البترول (أو النفط الخام)، والغاز الطبيعي. حالياً، يُعتبر الفحم الحجري مصدراً أولياً مهماً لتوليد الطاقة الكهربائية كما هو الحال مع الغاز الطبيعي، بينما يُقدّم البترول الجزء الأكبر من الطاقة الأولية المُستخدمة لتشغيل أنظمة النقل. يمكن أيضاً أن نلاحظ من الشكل (2–1) أنه يوجد فقط ثلاثة حوامل للطاقة التي تعتبر مهمة حالياً وهي منتجات البترول المكرّر والغاز الطبيعي والكهرباء. أما الهيدروجين، الذي غالباً ما يُعلن بشكل خاطئ على أنه مصدر الطاقة في المستقبل، فهو في الحقيقة حامل للطاقة وليس مصدراً أوّلياً لها. سوف نناقش هذا الجانب بتفصيل أكثر في فصل لاحق، لكن حالياً سوف نبيّنه ببساطة كحامل مُحتمل للطاقة لأنه غير مُستخدم حالياً بهذه الطريقة بدرجة كبيرة.

يوضح الشكل (2-1) ميزة مهمة أخرى وهي إطلاق الانبعاثات في مرحلتي المعالجة الأولية والتحويل عند طرف الاستهلاك الأخير. باستخدام مثال السيارة من جديد، نجد أن هذه الانبعاثات هي في الدرجة الأولى على شكل غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 وأول أكسيد الكربون CO، وغازات كربوهيدراتية غير مُحترقة HC_s، وأكاسيد الآزوت (بشكل رئيس NO وNO_2، لكنها عادةً موصوفة برمز NO_x بعض من هذه الغازات يتم إطلاقها خلال عملية التكرير، لكن معظمها يتم إطلاقه خلال التحويل الأخير من الطاقة الكيميائية إلى عمل مفيد في محرك السيارة. يُوفّر هذا الانبعاث للملوّثات خلال كل من مرحلة معالجة الطاقة الأوّلية ومرحلة طرف الاستهلاك، ارتباطاً مهماً جداً بين استهلاك الطاقة والبيئة. إن تفاعل المُركّبات الكربوهيدراتية غير المُحترقة مع NO_x، بِوُجود أشعة الشمس مثلاً، هو مسؤول عن تشكّل الضباب الدخاني الذي أصبح مشكلة رئيسة في المراكز المدينية. وقد تم تخفيف هذه المشكلة إلى حد ما في البلدان المُتطوّرة بسن القوانين الصارمة لتحد من الانبعاثات الصادرة عن السيارات ومحطات الطاقة الكهربائية، لكن هذه المشكلة سوف تستمر لتصبح مشكلة خطيرة جداً مع نمو عدد السيارات، وبخاصة في الاقتصادات النامية الكبيرة.

من ناحية أخرى، إن انبعاثات غاز CO_2 تؤدي إلى مشكلة بيئية مُختلفة فعلاً، وهي تسخين الكرة الأرضية المُسبَّب بواسطة تأثير الاحتباس الحراري. سوف نناقش هذا التأثير بتفصيل أكثر في الفصل التالي، لكن سوف نلاحظ هنا ببساطة أن جزَيئات غاز CO_2 (وغازات دفيئة أخرى، مثل الميثان) تعمل كحاجز انتقائي أو كستار يسمح بالإشعاعات ذات الموجة القصيرة الآتية من الشمس بالعبور لتدفئ الأرض، لكنه يحجز الطاقة الإشعاعية ذات الطول الموجي (wave Length) الأطول التي يُعاد إشعاعها عن الأرض (بشكل طبيعي) باتجاه الفضاء. يؤدي ذلك إلى مَكسب إضافي للطاقة بواسطة

الغلاف الجوي للأرض، وهكذا تزداد درجة حرارة الأرض مع الزمن. على الرغم من أن ذلك كان أمراً مثيراً للجدل (نوعاً ما) في الماضي، فإن معظم العلماء والمُراقبين يُوافقون الآن بأن متوسط درجة حرارة الأرض قد ارتفعت 0.75 درجة مئوية على مدى المئتي سنة الماضية وذلك بسبب النشاط الإنساني، أو فعل الإنسان بشكل أساسي، ما أدّى إلى ازدياد تركيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي. حالياً، وهذا التركيز هو بحدود 370 جزءاً بالمليون، وقد ارتفع من مقدار 280 جزءاً بالمليون الذي هو المُتوسط خلال فترة طويلة قبل الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر. اقترحت اللجنة الدولية لتغيّر المناخ (IPCC) بأن تركيز غاز CO_2 العالمي عند نهاية القرن الواحد والعشرين سوف تتراوح قيمته بين 550 و900 جزءاً بالمليون، مما يؤدّي إلى زيادة في مُتوسط درجة الحرارة على الأرض ما بين 1.4 ^oC و5.8 ^oC درجة مئوية. وتكون العواقب المترتبة عن هذه الزيادة الكبيرة في مُتوسط درجة حرارة الأرض نوعاً ما غير مُحددة، لكن من المُحتمل أنها سوف تؤدي فعلاً إلى تقلص الغطاءات الجليدية القطبية وانتشار حالات جفاف شديدة في بعض المناطق من العالم. وقد توقعت لجنة (IPCC) أيضاً بأنه يمكن أن يرتفع مُستوى سطح البحر بين 0.1 m و 0.9 m عند نهاية هذا القرن، الذي يمكن أن يؤدّي على الأقل عند القيمة التقديرية العليا (9.0) إلى عواقب خطيرة جداً بالنسبة إلى المجتمعات الساحلية. بالطبع يمكن أيضاً أن يؤدّي تسخين الأرض إلى امتداد فصل النمو النباتي في بعض أجزاء من العالم، وبالتالي يمكن أن ينتج من ذلك بعض الفوائد الإيجابية. لكن يبدو أن هناك إجماعاً على أن أي تسخين مهم للأرض سوف يتسبب بتراجع بيئي في معظم الأجزاء القابلة للضرر من العالم.

إن وحدة تخزين الطاقة المبيّنة في الشكل (2-1) ليست عملية تحويل للطاقة، لكنها جزء مهم من أنظمة عديدة للطاقة. وإنه من الضروري في حالات عديدة أن يتم تخزين الطاقة بشكلها الانتقالي

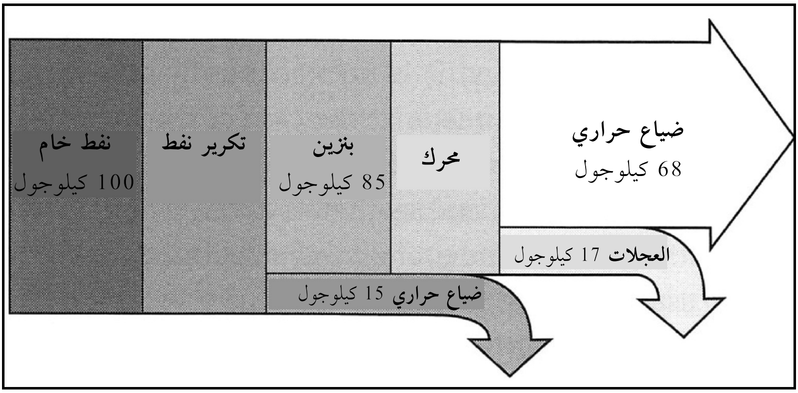
كحامل للطاقة قبل المرحلة الأخيرة للاستهلاك. في حالات كهذه لا يمكن ببساطة من الناحية العملية استخدام الطاقة مُباشرةً كما هي مُنتجة بالشكل الابتدائي للتحويل من طاقة أوّلية إلى حامل للطاقة. إن السيارة تشكل مثالاً بالطبع، حيث إن الأمر لن يكون عملياً بتزويد مستمر للبنزين من المصفاة إلى محرّك المركبة. وهكذا يُخزّن حامل الطاقة المَرحلي بعد التكرير، غالباً عند مراحل متعددة ومختلفة، قبل وصوله إلى خزان وقود السيارة. مثلاً، يُخزّن عادةً البنزين أولاً في خزّانات كبيرة في مصفاة التكرير لينقل بعدها بواسطة صهاريج من أجل تخزين ثانوي في محطات التعبئة حيث يتم ضخه أخيراً إلى خزّان السيارة عند الطلب. في الحقيقة، إن إحدى الفوائد الرئيسة للبنزين (أو أي وقود كربوهيدراتي سائل) هو أنه يُخزّن بسهولة، وله «كثافة طاقة» عالية جداً كما سوف نرى ذلك لاحقاً. لكن من الصعب تخزين الطاقة الكهربائية بكميات كبيرة، وعادةً تنتقل مباشرة كحامل للطاقة إلى مرحلة التحويل في الطرف النهائي للاستهلاك. في هذه الحالة يتم التحويل النهائي عادةً بواسطة محرّك كهربائي أو عنصر تسخين من نوع مقاومة كهربائية، وتكون هذه العناصر موصولة مباشرة عبر نظام التوزيع الكهربائي إلى مولّد في محطة الطاقة الكهربائية. بما أن الكهرباء تستطيع الانتقال عبر الأسلاك بكفاءة لمسافات طويلة، لذلك ليست هناك حاجة إلى التخزين بالنسبة إلى تطبيقات ثابتة في منازلنا ومكاتبنا ومصانعنا. ولكن بالنسبة إلى تطبيقات النقل، عدا القطارات الكهربائية أو الترام الكهربائي، يمثّل تخزين الكهرباء تحدياً رئيساً. تكون البطاريات فعّالة جداً في التطبيقات الكهربائية الصغيرة لأجهزة مثل الكمبيوترات المحمولة وأجهزة إلكترونية أخرى، لكنها لا تمتلك بَعد كثافة تخزين كافية للطاقة من أجل تطبيقات واسعة الانتشار كالسيارات الكهربائية مثلاً. سوف ندرس هذا التحدي بتفصيل أكثر في فصل لاحق.

هناك ميزة أخرى لسلسلة تحويل الطاقة وهي فُقدان بعض

الطاقة «المفيدة» خلال كل مرحلة من المعالجة. وعلى الرغم من أن قوانين الثرموديناميك تُعلمنا أن الطاقة هي دائماً مصونة ومحفوظة وأنها لا تُستَحدث ولا تَفنى، يصبح بعض منها مهدوراً بعد كل مرحلة في سلسلة التحويل. تنتهي عادةً هذه الطاقة «المهدورة» كـ«فقدان حراري» عند درجة حرارة مُنخفضة، وعلى الرغم من أنها تبقى شكلاً للطاقة فإن استخدامها ليس ذا جدوى تقنياً أو اقتصادياً. مثلاً، إذا ألقينا نظرة من جديد على حالة السيارة، نلاحظ فُقداناً للطاقة المُفيدة خلال مُعالجة النفط الخام في المصفاة لإنتاج البنزين، ومن جديد في تحويل الطاقة الكيميائية في البنزين إلى شغل ميكانيكي مُفيد بواسطة المحرك. هذا الفقدان للطاقة القابلة للاستخدام، والناتج من قوانين الثرموديناميك، يُقدّر عادةً بمقدار الكفاءة الذي هو نسبة الطاقة المُنتجة القابلة للاستخدام أو الشغل المبذول في عملية تحويل الطاقة، إلى الطاقة الإجمالية المتوفّرة في بداية العملية. إن كفاءة تحويل النفط الخام إلى بنزين في محطة التكرير هو85 في المئة تقريباً، في حالة السيارة، بينما من أجل تحويل الطاقة الكيميائية في وقود البنزين إلى شغل ميكانيكي بواسطة المحرك ووحدة نقل الحركة هي فقط حوالى 20 في المئة. بطريقة أخرى، بدءاً من 100 وحدة من الطاقة الأولية (عادة مقاسة بالكيلو جول **kJ**) على شكل نفط خام، سوف نحصل في النهاية على مقدار 85 كيلو جول من الطاقة المحتواة في البنزين (بعد تكرير النفط). وعندما يتم حرق البنزين في المحرك لإنتاج القدرة الميكانيكية (مُعدّل بذل الشغل مقاساً بوحدة kW)، ينتج من الـ 85 كيلو جول 17 كيلو جول فقط (20 في المئة من الـ 85 كيلو جول) من الشغل المُفيد عند العجلات. وبالتالي فإن إجمالي الكفاءة للطاقة في هذه العملية، من المصدر الأوّلي إلى طرف الاستهلاك، هي فقط 17 في المئة. والنتيجة الأخيرة هي أنه عندما نقود سيارة نموذجية فإن حوالى 83 في المئة من الطاقة الأوّلية تنتهي كطاقة مهدورة، تُفقد غالباً على شكل حرارة (عند درجة حرارة

مُنخفضة) يتم طردها من مشع السيارة وغازات العادم، وخلال عملية التكرير في مصفاة النفط.

إن هذه الكفاءة الكلية التي شرحناها للتو، بدءاً من الطاقة المتوافرة في المصدر الأوّلي، وانتهاءً بالطاقة المفيدة التي نحتاجها إلى دفع سيارتنا أو تدفئة منازلنا ومصانعنا، تُدعى في بعض الأحيان كفاءة «مصدر- إلى - عجلات» (Well-to-Wheels)، بإشارة واضحة إلى مثال السيارة الذي ناقشناه للتو. عند مقارنة الأداء لطرق مختلفة بتلبية حاجة طرف استهلاك محدد، أكانت سيارة أم محطة كهربائية تعمل على الفحم الحجري، فإن كفاءة «مصدر- إلى- عجلات» تكون المعيار الأفضل للأداء الكلي لنظام الطاقة. تصف هذه الكفاءة الأداء الكلي للسلسلة الكاملة لتحويل الطاقة، بدءاً من مصدر الطاقة الأوّلي، وانتهاءً بطرف الاستهلاك. في بعض الأحيان يكون التوضيح بالرسم لهذه الطريقة مُساعداً باستخدام مُخطط تدفّق الطاقة، وبشكل خاص في حالة تحليل أنظمة مُعقّدة ذات طاقات دخل متعددة وبأطراف استهلاك متعددة أيضاً. يُبين الشكل (2-2) مثالاً عن هكذا مُخطط بالنسبة إلى الحالة البسيطة جداً للسيارة والتي ناقشناها للتو. لقد تم استخدام مُخطط انسياب الطاقة، أو المسمى غالباً مخطط سانكي (Sankey Diagram)، في البداية من قبل المُهندس الإيرلندي سانكي (M.H.P.R. Sankey) الذي عاش في القرن التاسع عشر ليقدم تمثيلاً مرئياً سريعاً لمقدار انسياب الطاقة في سلسلة تحويل الطاقة. إن مرحلتي تحويل الطاقة في حالة السيارة، باستخدام النفط الخام كمصدر أوّلي للطاقة، موضحتان على شكل مستطيلين، أحدهما يمثل مصفاة النفط التي تحوّل النفط الخام إلى بنزين، والآخر يمثّل المُحرّك الذي يحوّل الطاقة الكيميائية في البنزين إلى عمل ميكانيكي ليدير العجلات. تُرسم عادةً المستطيلات أو الأسهم الممثلة لانسياب الطاقة بعرض معيّن يتناسب مع الجزء الذي تمثله من الطاقة الإجمالية والذي ينساب باتجاه انسياب الطاقة.



الشكل (2-2): مخطط «سانكي» (Sankey) بسيط لانسياب الطاقة اللازمة لتحريك سيارة

تبيّن المعاينة السريعة للمخطط أنه لكل 100 كيلو جول من الطاقة الموجودة في النفط الخام المستخدم في عملية التكرير ينتج 85 كيلو جول من الطاقة على شكل بنزين، ومن هذه الكمية يقدم المحرك 17 كيلو جول من العمل المفيد لقيادة السيارة. أما الطاقة المهدورة خلال مرحلتَي تحويل الطاقة هاتين فهي مبيّنة كـ«فقدان حراري» في كلتا الحالتين. في السيارة، يطرد معظم هذا الفقدان الحراري إلى الهواء المحيط عن طريق كل من غازات العادم الحارة وماء تبريد المحرك بواسطة المشعّ الحراري. باستخدام هذا المخطط كمثال، نستطيع أن نلاحظ، أنه في كل مرة نستعمل الطاقة، فإن طرف الاستهلاك النهائي لدينا هو جزء واحد فقط من سلسلة شاملة لتحويل الطاقة تعيدنا إلى الوراء إلى أحد مصادر الطاقة الأولية الثلاثة فقط. ولكي نفهم التأثيرات الكاملة عند استهلاكنا الطاقة في البيئة وفي الاستدامة الطويلة الأمد لكوكبنا، نحتاج دائماً أن نأخذ بعين الاعتبار السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة. إن تحليل «الارتباط» بالسلسلة الأقرب لنقطة استهلاكنا لا يعتبر جيداً، إذا أردنا أن ندرك بشكل تام عواقب خياراتنا للطاقة. سوف نبدأ في فصول لاحقة بوضع قاعدة تمكّننا من القيام بتحليل تام لسلسلة تحويل الطاقة. وسوف نرى

أيضاً الفائدة من قدرتنا على تصوّر انسياب الطاقة بسرعة باستخدام مخططات سانكي كتلك المبيّنة في الشكل (2-2) عندما ندرس الانسيابات المعقّدة من المصادر الأوّلية إلى الأطراف النهائية للاستهلاك من أجل اقتصاد تام للطاقة. يُقدّم مخطط سانكي صورة سريعة ومفيدة جداً لسلسلة تحويل الطاقة ويبيّن بوضوح أين تضيع الطاقة أو يتم تحويلها إلى طاقة مهدورة. ويمكن بناء مخططات مشابهة لتأخذ بالحسبان الانسياب الإجمالي للطاقة، من المصادر الأوّلية إلى الأطراف النهائية للاستهلاك، لوضع حلول اقتصادية كاملة أو حتى لمعرفة إجمالي الاستهلاك العالمي للطاقة. وتكون هذه العملية مفيدة بشكل خاص في إبراز الدرجة التي تصبح عندها الطاقة الأوّلية «مهدورة» على شكل فقدان حراري.

سوف نناقش هذا الجانب الأكثر شمولاً لمُخطط انسياب الطاقة في الفصل العاشر عندما ننظر بتفصيل أكثر إلى توازن الطاقة العالمي.

3 ـ الطاقة والبيئة

هناك قليل من الشك في أن الاستخدام الواسع للوقود الأحفوري يلقي إجهاداً جديراً بالملاحظة على كاهل البيئة. إن تأثير نواتج الاحتراق في جودة الهواء والمناخ يحصل محلياً وعالمياً. وقد تم التعرف إلى التأثيرات المحلية منذ عشرات السنين، والتي هي بشكل رئيس تلوّث للهواء وتشكيل للضباب الدخاني في المناطق المدينية الكبيرة، وقد تم التشديد بشكل مُلاحظ على قوانين حكومية لتخفيض تأثيرات تلوّث الهواء في السنوات الأخيرة. تتضمن هذه كلاً من معايير انبعاثات عوادم السيارات، بالإضافة إلى أنظمة تخص الانبعاثات من المنشآت الضخمة الثابتة، مثل محطات الطاقة الكهربائية التي تعمل على الوقود الأحفوري. تم سن هذه القوانين في الولايات المتحدة بواسطة وكالات مثل هيئة المصادر الجوية في كاليفورنيا (California Air Resources Board - CARB) ووكالة حماية البيئة الأميركية (US Environmental Protection Agency - EPA)، لكن تم الآن تبني قرارات مُماثلة في معظم الدول المتطورة. وهناك دليل مُتزايد واهتمام حول دور غاز CO_2 و«غازات دفيئة» أخرى في تغيّر المناخ العالمي على نطاق دولي. في هذا الفصل سوف ندرس كلاً من التأثيرات المحلية والعالمية لهذه الانبعاثات في الهواء، وسوف نشرح تقنيات التخفيف الحالية.

3. 1. الاهتمامات البيئية المحلية

إن تلوّث الهواء المحلي المتفشي في المناطق ذات الكثافة السكانية العالية في المُدن الكبيرة ينتج من التفاعل الكيميائي المباشر

مع نواتج الاحتراق ومن تشكل أوزون على مُستوى سطح الأرض. تتضمن نواتج الاحتراق غاز أول أكسيد الكربون CO، ثاني أكسيد الكبريت SO_2، أكاسيد الآزوت NO_x، المركّبات الكربوهيدراتية غير المحترقة، وأخيراً ثاني أكسيد الكربون CO_2 الذي هو بشكل رئيس الشغل الشاغل عالمياً. يعتبر أول أكسيد الكربون غازاً ساماً يتشكل عادةً بتركيز صغير في المحارق والمراجل المُعايرة بشكل جيد أو في محرّكات الاحتراق الداخلي المُعايرة أيضاً، لكن يمكن أن يتم تَشكّلهُ بمُستويات أعلى إذا لم يوجد هواء كاف من أجل الاحتراق التام. ينتج هذا الغاز بشكل رئيس من عادم محرك السيارة في المناطق المدينية، على الرغم من تخفيضه بشكل كبير بواسطة الاستخدام الواسع الانتشار للمُبادلات الحفزية أو الوسيطية (Catalytic Converters) في أنظمة عادم السيارة. مع ذلك، نادراً ما يُشكّل الآن هذا وحدَه تهديداً على الصحة البشرية. إذ يتشكل أكسيد الكبريت خلال عملية احتراق الوقود المُحتوي على الكبريت، وهذه العملية محددة الآن وبشكل رئيس عند استخدام فحم حجري ذي نسبة كبريت عالية، أو في بعض الحالات عند استخدام بنزين وديزل مُنخفض الجودة يحتوي على مستويات عالية من الكبريت. عندما يُطلق غاز SO_2 إلى الغلاف الجوي من مداخن محطات الطاقة الكهربائية أو عوادم السيارات، يمكن لهذا الغاز أن يتفاعل مع بخار الماء ليُشكل حمض الكبريت الذي يعتبر أحد أهم عناصر «المطر الحمضي». وبتركيز كاف، يمكن للمطر الحمضي أن يكون مؤذياً لأنسجة الرئتين البشرية، بالإضافة إلى الأبنية والنباتات والبيئة بشكل عام. تم في السنوات الأخيرة تخفيض انبعاث غاز SO_2 من محطات الطاقة التي تعمل على الفحم الحجري، وبالتالي تخفيض تشكّل المطر الحمضي اللاحق بشكل كبير، وذلك بواسطة حرق فحم ذي نسبة كبريت مُنخفضة، وبتركيب تجهيزات لتنقية غازات المداخن من مُركّبات الكبريت. كذلك تم تخفيض الانبعاثات من عوادم السيارة بالتركيب المُتواصل لتجهيزات إزالة

الكبريت في مصافي النفط لكي تُزيل الكبريت من كلا وقودي البنزين والديزل خلال عملية التكرير.

تُشكل أكاسيد الآزوت NO وNO_2، التي تُوصف مُجتمعة بالرمز NO_x، مع المُركبات الكربوهيدراتية غير المُحترقة، مصدر قلق رئيساً بسبب إمكانية تشكّل أوزون O_3 على مُستوى سطح الأرض. يتشكّل غاز أول أكسيد الآزوت NO خلال احتراق الوقود الأحفوري بوجود الآزوت في الهواء إما في محركات السيارات أو المحطات الحرارية لتوليد الطاقة الكهربائية، أو في الأفران والمراجل المُستخدمة لتدفئة المنازل والأبنية التجارية. يتحوّل غاز NO، الذي تشكّل خلال عملية الاحتراق، بسرعة إلى NO_2 بسبب وجود الأكسجين الزائد عندما يتم إطلاقه في الغلاف الجوي بشكل طبيعي. وبوجود أشعة الشمس يمكن لغاز NO_2 أن ينفصل لاحقاً، مؤدّياً إلى ذرّات أكسجين حرة تتفاعل مع جزيئات O_2 لتُشكل مُستويات عالية من الأوزون ذي «المُستوى الأرضي». يعتبر الأوزون مُؤكسداً ذا تفاعلية عالية جداً، إذ يمكن أن يُسبب تهيّجاً للأعين والرئات، ويستطيع أيضاً أن يهلك النباتات بالإضافة إلى اتلافه المواد الصناعية مثل المطاط والبلاستيك الصناعيّين. وبتراكيز عالية، موجودة بشكل رئيس في المراكز المدينية الكبيرة ذات المُستويات العالية من الإشعاع الشمسي والمواد الكربوهيدراتية غير المحترقة، يصبح هذا الغاز «ضباباً دخانياً» برائحته المُميزة ولونه البني المميز. يحتوي الضباب الدخاني على تركيز عال من جذور كربوهيدراتية ذات تفاعلية عالية، ولا يؤدّي ذلك إلى مشكلة الرؤية فقط، ولكن يمكن أن يؤدّي أيضاً إلى مشاكل صحية خطيرة، بشكل خاص لدى الناس الذين يعانون الربو أو عللاً رئوية أخرى. وقد تم تطوير تقنيات لتخفيض انبعاثات غازات NO_x من تجهيزات الاحتراق الثابتة مثل المراجل والأفران الكبيرة استجابةً إلى تشريعات بيئية في أجزاء عديدة من العالم. يتعلق إنتاج غازات NO_x مُباشرة بدرجة حرارة الاحتراق، وقد ركّزت شركات كثيرة على

تخفيض درجات حرارة الاحتراق، وبالتالي تخفيض تشكّل غازات NO_x. وقد أدّى ذلك إلى تطوير الحرّاقات «منخفضة - NO_x» التي تستخدم احتراقاً، مُتعدد المراحل أو تكنولوجيا (Lean-burn)(*) التي يُستخدم فيها هواء زائد لتخفيض درجات حرارة الاحتراق. وحيثما تكون القوانين صارمة بشكل خاص، يمكن تحقيق تخفيض أكبر في مستويات انبعاث غازات NO_x بواسطة اختزال حفزي انتقائي (Selective Catalytic Reduction)، الذي يتفاعل فيه وسيط الأمونيا المُرجع مع غاز NO لينتج الآزوت والماء. أما بالنسبة إلى السيارات، فإن تطوّر المُبادلات الحفزيّة الكيميائية من نوع الطرق - الثلاث (three-way catalytic converters)، ذات المقدرة على أكسدة المركّبات الكربوهيدراتية غير المحترقة وغاز CO، وعلى تخفيض انبعاث غازات NO_x، كان له أثر بارز في جعل السيارات الحديثة أقل تلويثاً بكثير مما كان ممكناً سابقاً. وقد خَفّض إدخال المُبادلات الحفزيّة الكيميائية على سيارات البنزين انبعاث غازات NO_x بأكثر من 90 في المئة مقارنةً بسيارات غير مُجهزة بهذه المُبادلات.

بالإضافة إلى التأثيرات الكيميائية للأوزون وتشكّل الضباب الدخاني، يوجد اهتمام مُتزايد بالتأثيرات الصحية للانبعاثات الهُبابية التي تُعتبر بشكل رئيس ميزة لما يصدر من احتراق الفحم الحجري ومن عادم محرك الديزل. تتشكل الجسيمات عبر عملية معقدة تتضمن مركبات كربوهيدراتية غير مُحترقة وغاز ثاني أكسيد الكبريت وغازات NO_x، بشكل رئيس، في اللهب الغني بالوقود كالذي نجده في مُحرّكات الديزل وأنظمة احتراق الفحم المسحوق المستخدمة في محطات توليد الطاقة الكهربائية. تمتلك الجسيمات المتشكلة مجالاً واسعاً من الأحجام، لكن الجسيمات التي اندرجت تحت التدقيق

(*) هي تكنولوجيا مُصممة للعمل على مزيج ذي جزء كبير من الهواء بالنسبة إلى الوقود لكي تُخفض من تلوّث الهواء.

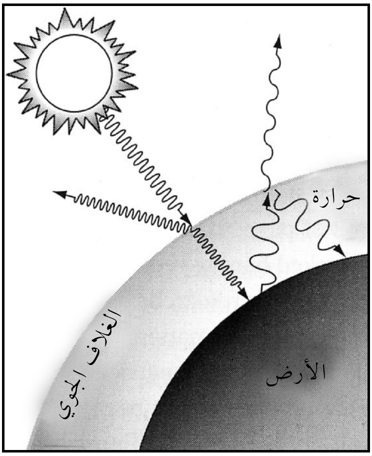
لأسباب صحية، وما زالت موضوع تشريعات بيئية للحد من إنتاجها، هي ذات أحجام بأقطار أقل من 10 ميكرون $(1\ \text{micron} = 10^{-3}\ \text{mm})$. تستطيع هذه الجسيمات المسماة PM_{10} أن تدخل عميقاً في الرئة. وهناك إجماع علمي مُتزايد بأن هذه الجسيمات تستطيع أن تسبب تداعيات قلبية ورئوية خطيرة مثل الربو، والتهاب القصبات الهوائية، وحتى سرطان الرئة والموت المبكر. وقد برز مؤخراً، اهتمام متزايد حول الجسيمات الأكثر صغراً $PM_{2.5}$، أو الجسيمات ذات القطر أقل من 2.5 ميكرون. وتبيّن بعض الدلائل بأنه يمكن لهذه الجزَيئات أن تكون مصدر قلق مساوياً أو أكبر، مما هو بالنسبة إلى الجُسَيمات الأكبر حجماً من ناحية أن لديها المقدرة حتى على التغلغل بعمق أكثر في الرئتين. ما زال يتم التحكم بالانبعاثات الجسيمية من محطات الطاقة التي تعمل على الفحم الحجري، والتي تحوي كمية معتبرة من الرماد المتطاير، مصدرها مُرسّبات كهروستاتيكية مكوّنة من أسلاك دقيقة مَشحونة كهربائياً لجذب الجسيمات التي تتم إزالتها بشكل دوري، عادةً بواسطة هز هذه الأسلاك. تميل هذه التقنية لتعمل جيداً بالنسبة إلى الجُسَيمات ذات الأحجام الكبيرة. ولكي تُزال جسيمات أقل حجماً يمكن للمُرسّب أن يتبع بكيس كبير، يُشكّل بالأساس مصفّى من القماش كبير جداً. وهذه التقنيات ليست كافية لنزع الجسيمات الصغيرة جداً كتلك التي يتم إنتاجها في محركات الديزل. إن إزالة هذه الجسيمات من محرك الديزل يعتبر مهماً وخصوصاً في المناطق المدينية حيث الكثافة السكانية عالية ويكون الناس على مقربة من عوادم الديزل. واستجابةً للقوانين الصارمة المتزايدة في تحديد كمية المادة الجسيمية المنبعثة من محركات الديزل، عمل المصنّعون بجد ليخفّضوا هذه المادة بواسطة زيادة ضغط حقن الوقود. وعَبّر بعض الباحثين، عن قلقه أن ذلك قد يجعل الأمور أسوأ بالفعل، إذ إن الضغط الزائد للحقن يؤدي إلى جسيمات أصغر حجماً بكثير. وقد تم تخفيض الكمية الكلية للمادة الجسيمية

المُنبعثة بشكل واضح، لكن تم تحقيق ذلك على حساب إنتاج كمية أكبر من الجُسيمات الأكثر صغراً. في السنوات الأخيرة، ما زال مصنّعو محركات الديزل يعملون على إنجاز «صائد للهُباب» لنزع الجسيمات الناعمة جداً المُحتواة في غازات العادم. وصائد الهباب هو عادةً عبارة عن قالب من السيراميك ذي بنية مَسامية ناعمة جداً، يصطاد الجسيمات لكنه يسمح لغازات العادم بالعبور. وبعد بضع ساعات من التشغيل يحتاج الصائد إلى «إعادة إحياء» بواسطة حرق المادة الجسيمية المُصطادة. لم يتم التوصل بعد في تطوير هذه الأجهزة إلى مرحلة تصبح عندها موثوقة إلى حد مقبول، أو غير مكلفة نسبياً، بحيث تُركّب على المَركبات التجارية بشكل روتيني.

2.3. الاهتمامات البيئية العالمية

إن تأثير الاحتباس الحراري في مستوى الكرة الأرضية، وتوقعات ارتفاع متوسط درجة حرارة الأرض هو الذي أدى إلى الاهتمام المتعاظم بالموضوع. يبيّن الشكل (3-1) مخططاً بسيطاً يوضح هذا التأثير. يتكوّن الإشعاع الشمسي الناتج من درجة الحرارة العالية جداً للشمس، بشكل رئيس، من إشعاع مرئي أو قريب من المرئي بطول موجي قصير نسبياً، حيث يكون الغلاف الجوي شفافاً بشكل كبير لهذا الإشعاع. بتعبير آخر، على الرغم من انعكاس جزء صغير من هذا الإشعاع بواسطة الغلاف الجوي عائداً إلى الفضاء، فإن معظمه يعبر الغلاف مباشرة (كما لو أن الغلاف الجوي نافذة زجاجية) ويُسخن سطح الأرض. تُعيد الأرض الدافئة إشعاع بعض من هذه الطاقة إلى الفضاء، لكن بما أن هذه الإشعاعات يتم إنتاجها عند درجات حرارة منخفضة نسبياً فإنها ستكون بشكل رئيس ذات أطوال موجية طويلة، أو إشعاعات تحت الحمراء. إن بعضاً من غازات الغلاف الجوي للأرض تعمل كنافذة زجاجية، تكون معتمة بشكل خاص (أو ذات نفاذية مُنخفضة) لهذا النوع من الإشعاع طويل الموجة، ولذلك تُدعى «بغازات الاحتباس» الحراري (GHGs). بسبب

ذلك فإن معظم الإشعاع طويل الموجة ينعكس عائداً إلى سطح الأرض، بالتالي يحصل عدم توازن بين الطاقة التي تمتصها الأرض وتلك التي يُعاد إشعاعها بعيداً عن الأرض، ما يؤدي إلى تسخين سطح الأرض والغلاف الجوي المحيط، تماماً كما يحصل في البيوت الزجاجية الزراعية.



الشكل (3-1): تكوّن الاحتباس الحراري للغلاف الجوي

تَعتمد درجة عدم توازن الطاقة الإشعاعية (المشروحة أعلاه) كثيراً على قدرة النفاذية للغلاف الجوي، بمعنى آخر، الدرجة التي تسمح بها غازات الغلاف الجوي بنفاذ أو إيقاف الإشعاعات تحت الحمراء المنطلقة من الأرض. يُرجع علماء المناخ التأثيرات في تغيُّر كمية الإشعاع الشمسي التي تصل إلى سطح الأرض لتغيّرات في «اضطراب التوازن الإشعاعي» (Radiative Forcing)(*) للغلاف الجوي.

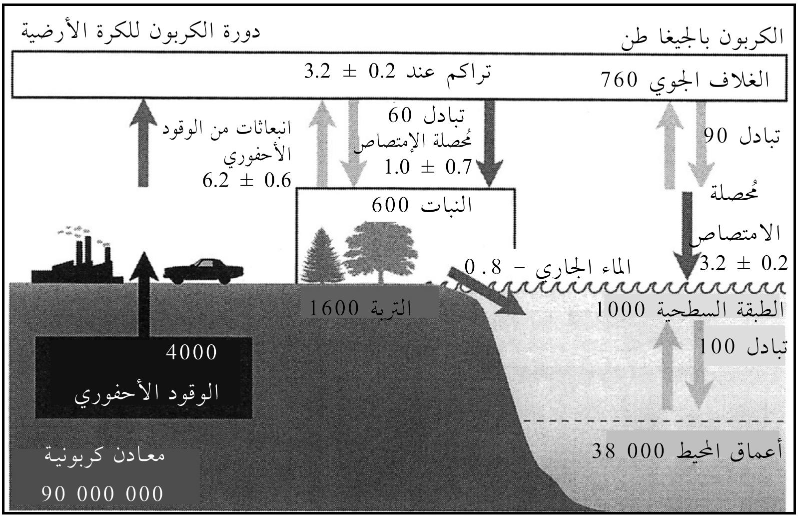
(*) يعني هذا المصطلح العملية التي تغير توازن الطاقة بين الإشعاع الشمسي الوارد والأشعة تحت الحمراء الصادرة عن الأرض، متضمنةً النشاطات البركانية وغازات الدفيئة.

تكون بعض الغازات عاكسة أكثر بالنسبة إلى الإشعاع الصادر عن سطح الأرض مقارنةً بالإشعاعات الأخرى، ويُقاس تأثيرها النسبي بمقدرتها على تسخين الأرض (Global Warming Potential - GWP). من المحتمل أن يكون بخار الماء الغاز الأكثر أهمية من ضمن هذه الغازات، ويمكن أن يتغير تركيزه في الغلاف الجوي بشكل واضح مكانياً أو زمنياً. وتتعلق كمية بخار الماء في الغلاف الجوي بشكل أساس بعمليات طبيعية، ولذلك لا يعتبر البخار عادةً غاز احتباس حراري من فعل الإنسان. أما غازات الغلاف الجوي التي هي بطبيعتها من فعل الإنسان، والتي تزايد تركيزها مع الزمن، فتتضمن كلاً من: غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2، غاز الميثان CH_4، غاز أكسيد الآزوت N_2O، وعدداً من الغازات مثل الكلوروفلوروكربون CFCs التي توجد بكميات ضئيلة لكن لديها مقدرة قوية على تسخين الأرض. بما أن غاز CO_2 يوجد في الغلاف الجوي بكميات أكبر بكثير من غازات الدفيئة الأخرى التي هي من فعل الإنسان، يُصنّف عادة بمرتبة «مَقدرة على تسخين الأرض» (GWP) تساوي واحد. أما الغازان الدفيئان التاليان الأكثر أهمية فهما غاز الميثان CH_4 بمرتبة «مَقدرة على تسخين الأرض» 23، وغاز N_2O بمرتبة 296 (راجع Houghton, 2004). حتى لو أن غاز CO_2 لديه المرتبة الأقل ضمن الغازات الثلاثة، يبقى بشكل كبير الأكثر أهمية لأنه ينبعث بكميات أكبر بكثير. وقد قَدّر هوتن (Houghton) أن غاز CO_2 مسؤول عن 70 في المئة من تأثير الاحتباس الحراري المتزايد والناتج من تحرير غازات الدفيئة بفعل الإنسان، بينما غاز الميثان مسؤول عن 24 في المئة، وغاز N_2O عن 6 في المئة. لهذا السبب استقطب غاز CO_2 الاهتمام الأكبر من العلماء وراسمي السياسات، على الرغم من أن غاز CO_2 ليس الغاز الدفيء المهم الوحيد. إذا ازداد مع الزمن متوسط التركيز على مدى زمني طويل لغاز CO_2 في الغلاف الجوي، سوف يكون هناك تناقص في نفاذ الموجة الطويلة عبر الغلاف الجوي مؤدياً

الى حجز أكثر للأشعة تحت الحمراء. وسوف يؤدي ذلك إلى ازدياد في محصلة الطاقة المُمتصة من قبل كل من سطح الأرض والغلاف الجوي، والنتيجة هي ازدياد في متوسط درجة حرارة الأرض. لذلك توجد مراقبة مُتزايدة لدورة الكربون على الأرض (Global Carbon Cycle) واهتمام بمستويات تركيز غاز CO_2 المتزايدة في الغلاف الجوي.

تبيّن دورة الكربون للكرة الأرضية الموضحة في الشكل (3-2)، والمَأخوذة من تقرير الهيئة الملكية للمملكة المتحدة لتلوث البيئة (Energy-The Changing Climate 2000)، العمليات المعقّدة فعلاً خلال عملها في تبادل الكربون بين أجزاء مختلفة من الأرض وغلافها الجوي. تمثّل البيانات بالخط العريض في كل «خزان» (Reservoir) أو حوض كمية الكربون المُخزّنة بوحدة جيغا طن (مليار طن). تمثّل الأسهم الرمادية التبادلات الطبيعية بين الخزانات، التي تكون تقريباً بحالة توازن، بينما تُمثّل الأسهم الداكنة محصلة التدفق في كل حالة. تبيّن البيانات بالأحرف المائلة الملاصقة لكل سهم من الأسهم تدفقات غاز CO_2 بوحدات جيغا طن بالسنة من الكربون بين الخزانات المختلفة. من الواضح أن التدفقات الطبيعية هي أعلى بكثير من التدفق بفعل الإنسان الناتج من احتراق الوقود الأحفوري والعمليات الصناعية كإنتاج الإسمنت. إن النتيجة النهائية لجميع محصلات تدفقات الكربون المُبيّنة هي تراكم لحوالى 3.2 جيغا طن بالسنة تقريباً للكربون في الغلاف الجوي. بالإضافة إلى الكربون المُخزن على شكل غاز CO_2، يوجد حوالى 4000 جيغا طن من الكربون مُخزّنة كوقود أحفوري؛ فحم حجري، نفط، وغاز طبيعي في القشرة الأرضية، كما هو مبيّن في الشكل (3-2). إن استهلاك هذه المصادر يشكل المصدر الرئيس لإطلاق حوالى 6.2 جيغا طن بالسنة من غاز CO_2 بفعل الإنسان إلى الغلاف الجوي. يعتبر مخزون الوقود الأحفوري معتدلاً نسبياً مقارنةً بكمية الكربون المخزنة في المحيطات، أو في الأرض كمعادن

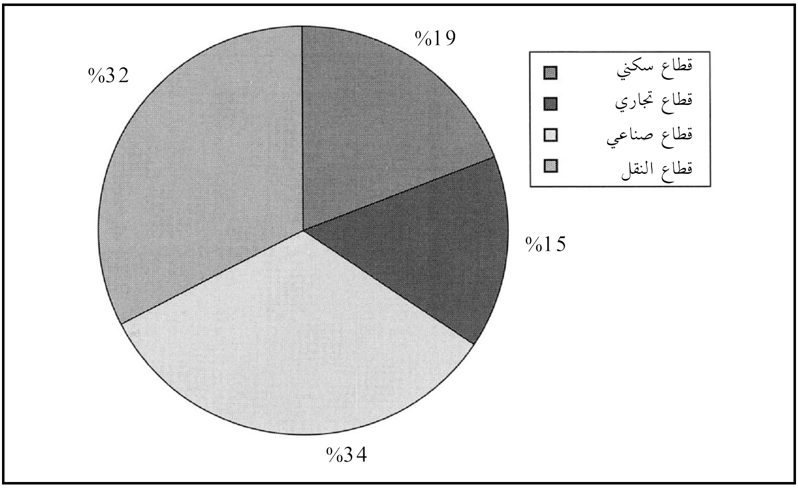
كربونية (Carbonate Minerals)، لكنها تبقى أيضاً أكبر بكثير من إجمالي الكربون في الغلاف الجوي. بناءً على ذلك يمثل الوقود الأحفوري مصدراً ذا مقدرة وافرة للكربون، الذي سوف يضاف إلى الغلاف الجوي إذا تم استهلاكه كلياً لتزويد الاحتياجات البشرية للطاقة بدون حجز وتخزين غاز CO_2 المنبعث.



الشكل (3-2): دورة الكربون في الطبيعة

المصدر: Royal Commission on Environmental Pollution's 22nd Report: Energy-The Changing Climate.

إن احتراق الوقود الأحفوري هو المصدر الرئيس لانبعاثات غاز CO_2، ومثل ذلك يمكن رده إلى القطاعات الرئيسة لاستهلاك الطاقة، مُتضمنةً الأبنية السكنية والتجارية والعمليات الصناعية والنقل. يبيّن الشكل (3-3) توزع انبعاثات غاز CO_2 لكل قطاع استهلاك في الولايات المتحدة للعام 1995. تتغير بشكل طبيعي مُساهمات كل قطاع استهلاك من بلد إلى آخر، ويَعتمد ذلك على حالة التطوّر الصناعي، وخصوصاً على عدد السيارات العاملة. مثلاً، في البلدان

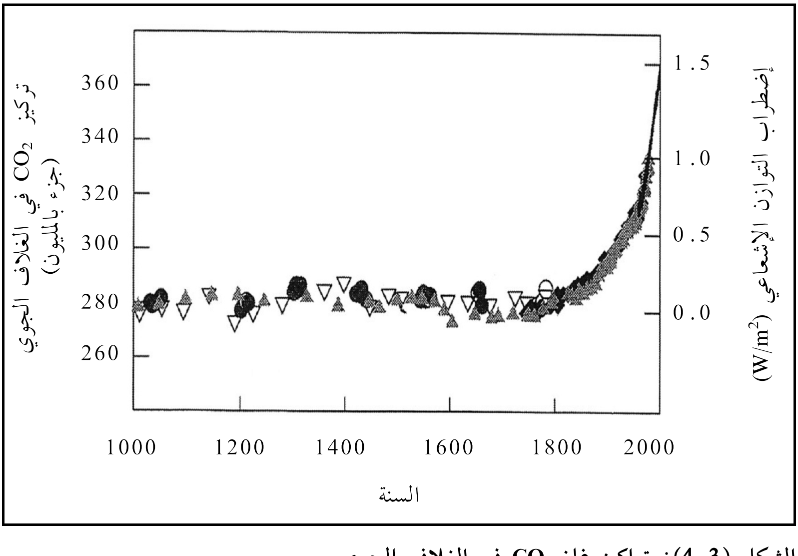


الشكل (3-3): انبعاثات CO_2 في USA بقطاعاتها، 1995

المصدر: مبني على بيانات من وكالة معلومات الطاقة - إنبعاثات غازات الدفيئة في الولايات المتحدة.

العالية التصنيع، يميل النقل والعمليات الصناعية وتوليد الطاقة الكهربائية إلى أن يكونوا المُستخدمين المسيطرين للوقود الأحفوري، وبذلك المصادر البارزة لانبعاثات غاز CO_2 أيضاً. مثلاً، لدينا 35 في المئة تقريباً من إجمالي الانبعاثات المبيّنة في الشكل (3-3)، ناشئة من محطات توليد الطاقة الكهربائية. أما في البلدان الأقل تطوراً فإن استخدام الوقود الأحفوري، وبالتالي وجود انبعاثات غاز CO_2، يمكن أن يُرجح أكثر إلى التدفئة المنزلية والطهي مقارنةً باستخدام السيارات. يمكن تخفيض استخدام الوقود الأحفوري في بعض القطاعات، وبالتالي تخفيض انبعاثات CO_2، باستبدال الوقود عالي الكربون كالفحم بوقود مُنخفض الكربون كالغاز الطبيعي. وقد أُنجز ذلك جزئياً في أوروبا، حيث تم استبدال محطات الطاقة الكهربائية العاملة على الفحم الحجري بمحطات تعمل على الغاز الطبيعي ومجهزة بتوربينات غازية ذات دارة مُركّبة (CCGTs). كذلك، إن زيادة كفاءة طرف

استهلاك الطاقة في أي قطاع يمكن أن يصبح فعّالاً في تخفيض استهلاك الطاقة، وبذلك تخفيض انبعاثات غاز CO_2. ويمكن أن تكون هذه الزيادة في الكفاءة أسهل للتحقق في بعض القطاعات، مثلاً في تدفئة المنازل، منها في قطاعات أخرى كقطاع النقل. على أي حال، إن إدخال معايير كفاءة الوقود للسيارات في الولايات المتحدة، بالإضافة إلى كلفة الوقود الزائدة والانتقال من استخدام محركات البنزين إلى استخدام محركات ديزل أكثر كفاءة في بعض الأسواق، قد أدى إلى كسب معتبر في كفاءة السيارات على مدى العقود الثلاثة الماضية.



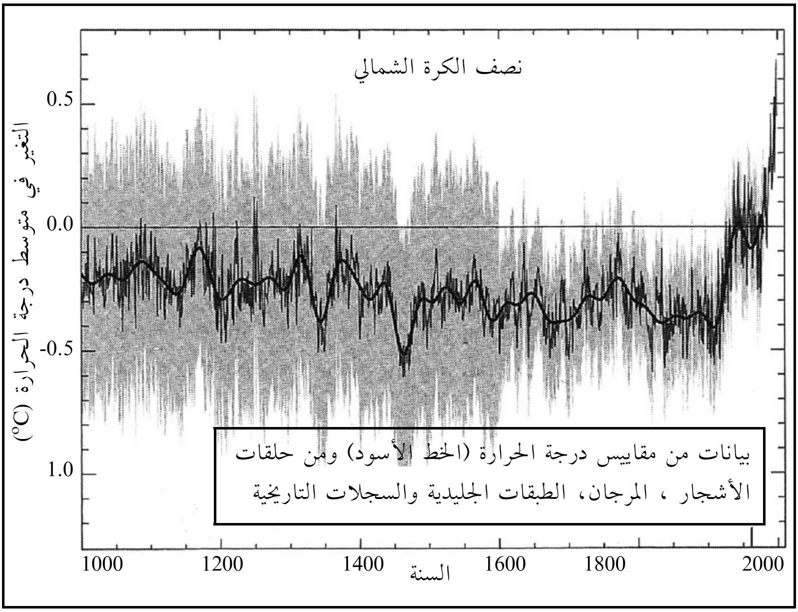
الشكل (3–4): تراكيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي

المصدر: IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis

يبيّن الشكل (3–4) الصادر عن اللجنة الدولية لتغير المناخ (IPCC, 2005) تركيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي على مدى الألف سنة الأخيرة. ويمكن ملاحظة أن تركيز غاز CO_2 قبل الثورة

الصناعية، إبتداءً من أواخر القرن الثامن عشر، كان ثابتاً تقريباً عند مستوى 280 جزءاً بالمليون. ازداد هذا المستوى بسرعة خلال القرنين التاسع عشر والعشرين، ليصل اليوم إلى حوالى 370 جزءاً بالمليون. يمثّل هذا التركيز كمية الكربون الإجمالية، حوالى 760 جيغا طن، موجودة حالياً في الغلاف الجوي، كما هو مبيّن في الشكل (3-2).

يمكن ملاحظة تأثير هذا الازدياد الكبير في تركيز غاز CO_2 في درجة حرارة سطح الأرض في الشكل (3-5)، ببيانات من مصادر مختلفة متضمنةً قياسات بواسطة موازين الحرارة على مدى القرنين الأخيرين الماضيين، ودرجات حرارة مستنتجة من حلقات مقاطع جذوع الأشجار، الطبقات الجليدية، ومن سجلات تاريخية أخرى



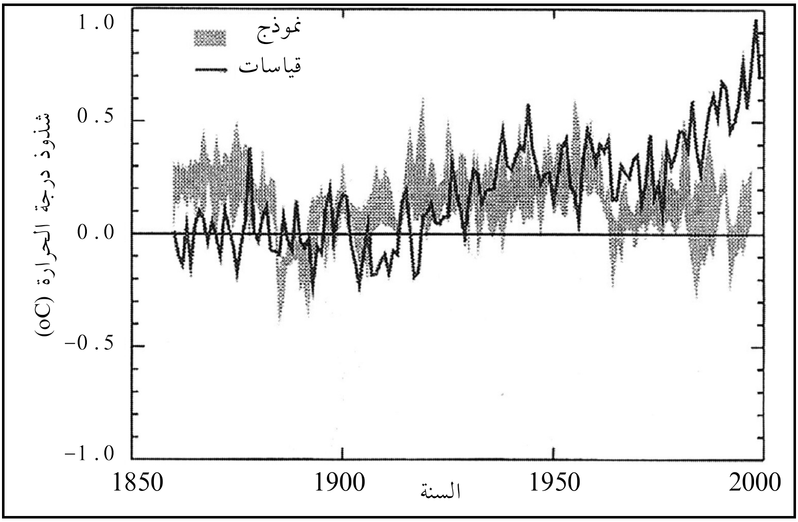
الشكل (3-5): تغير درجة حرارة سطح الأرض

المصدر: IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis

للعصور السابقة. يمكن ملاحظة وجود ترابط وثيق جداً بين الازدياد، في التركيز العالمي لغاز CO_2، كما هو مبيّن في الشكل (3-4) والازدياد في درجة حرارة الأرض.

لقد أنجز العلماء الذين يعملون مع هيئة (IPCC) أيضاً، نمذجة حاسوبية مُكثّفة لتأثير غازات الدفيئة لكي يحاولوا توقع تأثير الزيادات الإضافية في مُستويات تركيز غاز CO_2 على متوسط درجة الحرارة للأرض. واستخدمت نماذج الحاسوب عدداً من السيناريوهات المختلفة لانبعاثات ولنشاطات اقتصادية لكي تقدّر بشكل أفضل المجال المُحتمل لتركيز غاز CO_2 لارتفاع متوسط درجة حرارة الأرض. تبيّن نتائج هذه الحسابات، المبنيّة على السيناريو المحدد الذي تم اختياره، أن تركيز غاز CO_2 سوف يصل بشكلٍ محتمل إلى قيمة تتراوح بين حوالى 550 و900 جزء بالمليون في نهاية القرن الحادي والعشرين. وقد دَرست أيضاً هذه النماذج التأثير النسبي في درجة حرارة الأرض «للاضطرابات الطبيعية في التوازن الإشعاعي» (Natural Forcing) للغلاف الجوي، بسبب تغيرات في الإشعاع الشمسي مثلاً، و«للاضطرابات في التوازن الإشعاعي بفعل النشاط البشري» (Anthropogenic Forcing) بسبب انبعاثات غازات الدفيئة بفعل الإنسان.

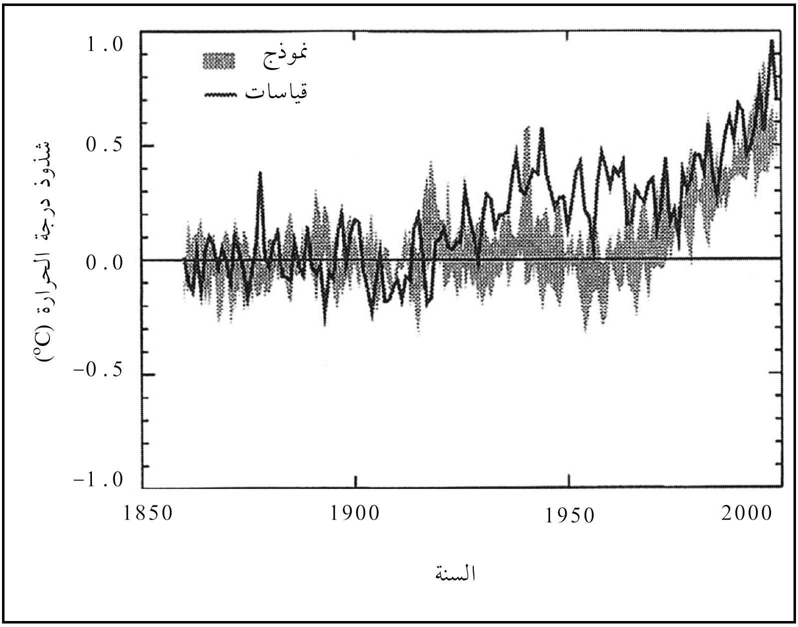
تبيّن الأشكال من الشكل (3-6) إلى (3-8) نتائج توقعات النمذجة بالنسبة إلى سيناريو يعتمد حالة - أساسية، مقارنةً بقيم مُقاسة لتغيرات درجة الحرارة بين عامي 1850 و2000. تم توجيه توقعات النمذجة أولاً مع افتراض الاضطراب الطبيعي في التوازن الإشعاعي وحدَه فقط، بعدئذٍ مع الاضطراب في التوازن الإشعاعي بفعل النشاط البشري لوحده فقط، وأخيراً مع كليهِما، كما هو مبيّن في الأشكال من الشكل (3-6) إلى (3-8) على التوالي.



الشكل (3-6): تغيرات درجة الحرارة المتوقعة، نتيجة الأخذ بـ «الاضطراب في التوازن الإشعاعي الطبيعي» لوحده فقط

المصدر: IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis

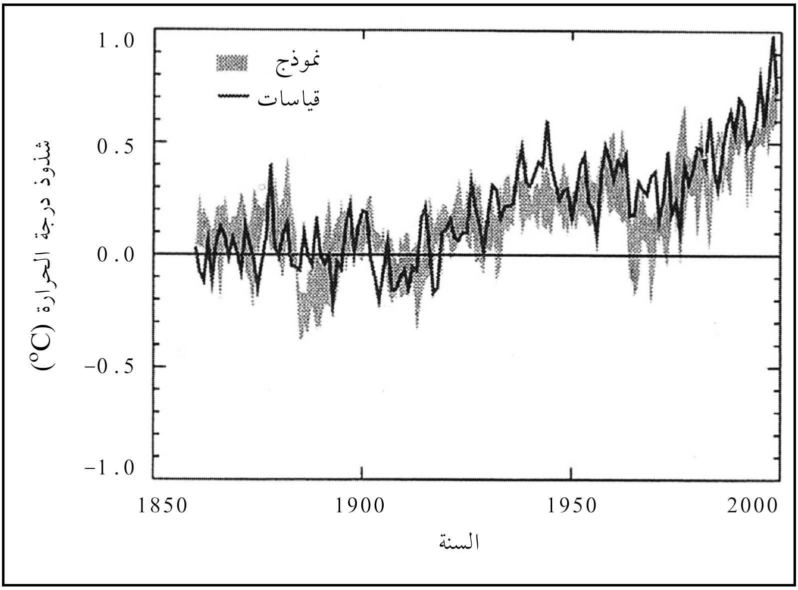
يمكن الملاحظة من الشكل (3-6) أنه يوجد ترابط ضعيف بين الارتفاع المقدّر لدرجة الحرارة (بواسطة نموذج)، بفرض الاضطراب الطبيعي وحدَه فقط، والارتفاع الفعلي المسجّل عن طريق القياسات الفعلية. إن ذلك صحيح بالأخص لحوالى الخمس وعشرين سنة الأولى عندما كانت الثورة الصناعية في أوجّها، وكذلك للخمس وعشرين سنة الأخيرة، التي خلالها كان هناك نشاط اقتصادي قوي في العديد من البلدان، مع ازدياد لاحق كبير في انبعاثات غاز CO_2. مع افتراض الاضطراب العائد للنشاط البشري لوحده فقط في النموذج، كما هو مُبيّن في الشكل (3-7)، يتبيّن أن التوقع أفضل بكثير خلال السنوات الأولى والأخيرة، لكنه لم يكن جيداً جداً خلال العقدين بين عامي 1950 و1970، عندما كان يوجد انخفاض ملحوظ في النشاط الشمسي.



الشكل (3-7): تغيرات درجة الحرارة المتوقعة نتيجة الأخذ بـ «الاضطراب الإشعاعي بفعل النشاط البشري» فقط

المصدر: IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis

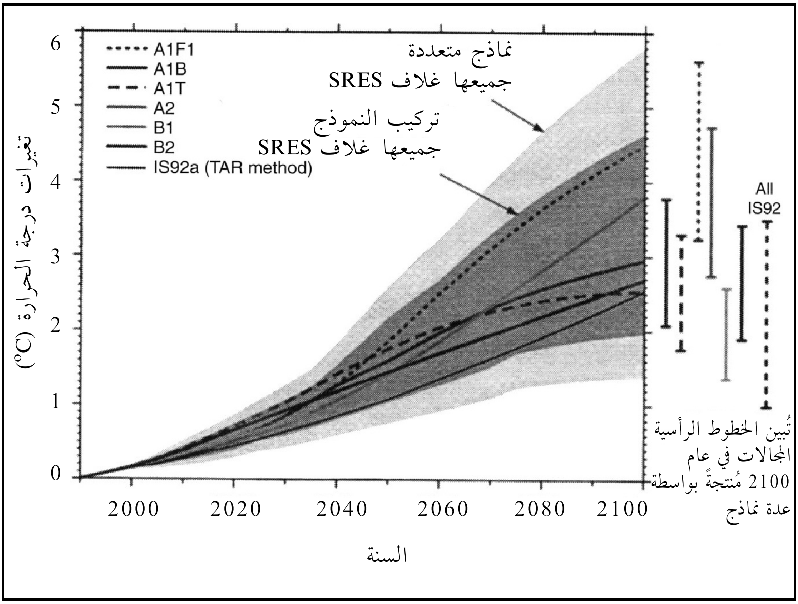
أخيراً، وبتضمين تأثير كل من الاضطراب الإشعاعي الطبيعي والاضطراب الإشعاعي بفعل النشاط البشري في النموذج، نجد أن الارتفاع المتوقع لدرجة الحرارة، كما هو مبيّن في الشكل (3-8)، يتوافق بشكل قريب جداً مع سجلات درجة الحرارة المُقاسة. تقدم النتائج من هذه المجموعات الثلاث للتوقعات، دليلاً قوياً جداً على أن الازدياد السريع الملاحظ في درجة الحرارة على مدى الخمسين سنة الأخيرة من المحتمل جداً أن يكون بسبب تأثيرات النشاط البشري، ويمكن أن يُعزى بشكل كامل تقريباً إلى احتراق الوقود الأحفوري.



الشكل (3-8): تغيرات درجة الحرارة المتوقعة نتيجة الأخذ بالاضطرابين الطبيعي وبفعل النشاط البشري

المصدر: IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis

على الرغم من أن نتائج النموذج المبيّنة في الأشكال من الشكل (3-6) إلى (3-8) تم الحصول عليها بالاعتماد على سيناريو الحالة الأساسية للانبعاثات والنشاط الاقتصادي، فقد قام باحثون بحسابات بالاعتماد على مدى من السيناريوهات البديلة، المعروفة باسم «التقرير الخاص عن سيناريوهات الانبعاثات» (Special Report on Emission Scenarios)، (SRES) كما وصفته هيئة (IPCC). يبيّن الشكل (3-9) نتائج التوقعات للمئة وعشرين سنة التالية بالاعتماد على كامل مجال هذه السيناريوهات. والنتائج مبيّنة بالاعتماد على كلٍ من: مجال تام لنماذج متعددة باستخدام جميع سيناريوهات (SRES)، ومجموعة من النماذج أكثر تحديداً، ومن جديد



الشكل (3-9): تغيرات درجة الحرارة المتوقعة بالنسبة إلى سيناريوهات متنوعة من الانبعاثات والنشاطات الاقتصادية

المصدر: IPCC Climate Change 2001: The Scientific Basis

باستخدام المجال التام لسيناريوهات (SRES). تتوقع هذه الحسابات زيادة إجمالية في متوسط درجة الحرارة للأرض بين عامي 1990 و2100 تتراوح بين حد أدنى 1.4 °C وحد أعلى 5.8 °C عند الحد الأعلى، بدون شك، سوف تحصل تغيرات كبيرة نسبياً لمناخ الأرض، متضمنةً عواصف أكثر تكراراً وأكثر شدةً، وذوبان الغطاء الجليدي القطبي، وظهور أكثر تكراراً للجفاف. سوف يحصل أيضاً ارتفاع واضح في متوسط مستوى البحار، مع توقع يصل حتى متر واحد، مؤدّياً إلى انتشار ظاهرة التعرية والفيضانات في المناطق الساحلية على مستوى العالم.

ونتيجة وجود الخطر الحقيقي الذي يعكسه مثل هذا التغير

المناخي على رفاه البشرية والاقتصاد العالمي، يناقش العلماء والمهندسون وراسمو السياسات الآن تكنولوجيات التلطيف الطويلة الأمد لتخفيض، أو على الأقل، تقليل الازدياد السريع في مستويات تركيز غاز CO_2 للأرض التي تم توقعها للقرن الواحد والعشرين. وفي الوقت الحالي، تتركز هذه المناقشات أساساً للحصول على موافقة دولية من أجل الحد من إنتاج غازات الدفيئة تحت رعاية اتفاقية نظام الأمم المتحدة لتغيّر المناخ (UNFCCC)، التي تم تبنّيها بشكلٍ رسمي عام 1992 في نيويورك. في إطار هذه الاتفاقية، حاولت معظم الدول الصناعية الكبيرة، ومن ضمنها أعضاء من الـ (OECD)(*) و12 دولة بحالة «تحول اقتصادي»، أن تعيد مستويات انبعاثاتها من غازات الدفيئة إلى مستويات عام 1990 وذلك عند عام 2000. أُتبعت هذه الاتفاقية بتواقيع التزامية لمعاهدة كيوتو (Kyoto Protocol) للقيام بعمل محدّد تم طرحه في كيوتو اليابان عام 1997. بناءً على هذا الاتفاق، وافقت الدول الصناعية المحدّدة في الملحق (1) لاتفاقية كيوتو على تخفيض انبعاثاتها لمجموعة من ستة غازات دفيئة إلى ما دون المستويات التي تم إنتاجها في عام 1990 بأهداف يتراوح متوسطها بين 0 في المئة و8 في المئة، على مدى الفترة من 2008 إلى 2012، كما هو مبيّن في الجدول (3-1). في حالة أو حالتين استثنائيتين (أستراليا، ايسلندا، والنرويج)، كانت الأهداف المتفق عليها فعلياً هي ارتفاع عن مستويات 1990 بسبب الصعوبات التي تواجهها الاقتصاديات الأصغر في الحصول على التغيرات الضرورية لنظام التزود بالطاقة لديهم. وافقت دول الاتحاد الأوروبي (EU) الخمسة عشر (قبل قبول عشرة بلدان جديدة في 2004)

(*) OECD هي اختصار لمجموعة بلدان «منظمة التعاون الاقتصادي والتطور» التي تؤلف 17 في المئة من سكان العالم حسب عام 1994، مثل: أستراليا، النمسا، بلجيكا، كندا، الدنمارك، فنلندا، فرنسا، ألمانيا، اليونان . . . الخ.

على تخفيض متوسطه 8 في المئة من انبعاثات غازات الدفيئة عبر الاتحاد ككل. وقد أدّت المفاوضات اللاحقة بين بلدان الاتحاد الأوروبي، مثلاً، إلى وضع الهدف في المملكة المتحدة إلى 12.5 في المئة تحت مستوى عام 1990 خلال الفترة من 2008 إلى 2012.

الجدول (3-1):
أهداف اتفاقية كيوتو

«الملحق 1» البلدان	هدف %
- الاتحاد الأوروبي 15-، بلغاريا، جمهورية التشيك، إستونيا، لاتفيا، ليتوانيا، رومانيا، سلوفاكيا، سلوفينيا، سويسرا.	8-
الولايات المتحدة الأميركية[a].	7-
كندا، هنغاريا، اليابان، بولندا.	6-
كرواتيا.	5-
نيوزيلاندا، روسيا، أوكرانيا.	0
النرويج.	1
أستراليا[a].	8
ايسلندا.	10

ملاحظة:

(a) لم توقع كل من الولايات المتحدة وأستراليا الاتفاقية.

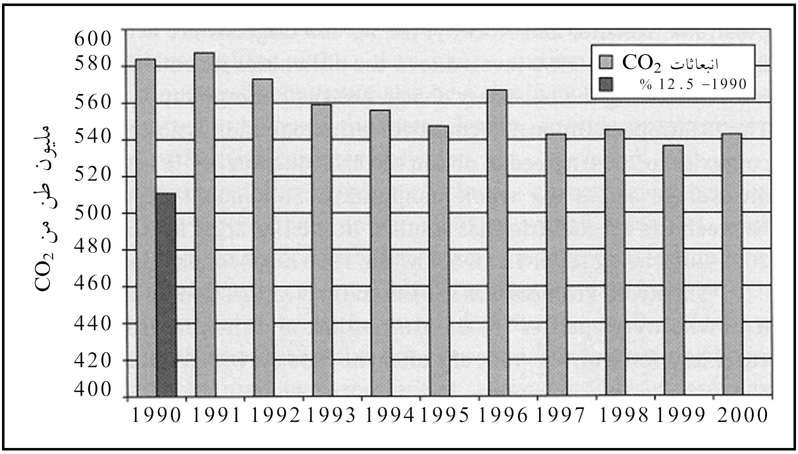
المصدر: Houghton (2004).

خضعت معاهدة كيوتو للتصديق الأخير من قبل الدول الأعضاء في الاتفاقية، وكان من المفروض أن تدخل الاتفاقية حيّز التطبيق في اليوم

التسعين بعد التاريخ الذي قدم فيه ليس أقل من 55 عضواً في الاتفاقية، من ضمنهم دول الملحق (1) التي هي مسؤولة كلياً عن 55 في المئة على الأقل من انبعاثات غازات الدفيئة للعام 1990، إشعار تصديقها الأخير إلى الأمم المتحدة. أما الولايات المتحدة وأستراليا فقد ثابرتا لاحقاً بالقول إنهما لن توقعا الاتفاقية. وفي 2 تشرين الثاني/نوفمبر عام 2004 ، قدمت 127 دولة ومنظمة تكامل اقتصادي محلي إشعارات التصديق، وكانت النسبة الإجمالية للانبعاثات من بلدان الملحق (1) المصدّقة على الاتفاقية 44.2 في المئة. وبالتالي سوف تصبح المعاهدة قابلة للتطبيق إذا قدم أي من الولايات المتحدة، التي هي مسؤولة عن 36.1 في المئة من انبعاثات الملحق (1)، أو روسيا، التي هي مسؤولة عن 17.4 في المئة من هذه الانبعاثات، إشعاراتها بالتصديق. وعلى الرغم من أن الولايات المتحدة أشارت إلى أنها لن توقع، فقد وَقَّعَ رئيس روسيا قانوناً فيدرالياً صدّق بموجبه المعاهدة في 4 تشرين الثاني/نوفمبر 2004. بعدئذ أصبحت معاهدة كيوتو سارية المفعول في 16 شباط/فبراير 2005، بعد تسعين يوماً من وصول إشعار التصديق الروسي إلى الأمم المتحدة في نيويورك.

على أي حال، من غير المؤكد إذا كانت معظم البلدان سوف تحقق هذه الأهداف، وبخاصة أنه تم في الحقيقة حتى الآن تحقيق عدد قليل من تقنيات التلطيف. كذلك، في الحقيقة إن عدم توقيع الاقتصاد العالمي الأكبر على الاتفاقية طرح قضية التنافس الصناعي بين هذه البلدان التي شرعت باتخاذ إجراءات تخفيف الانبعاثات. سوف يكون ذلك مهماً، بشكل خاص، بوجود القوة الاقتصادية المتنامية (وانبعاثات غازات الدفيئة) للاقتصاديات النامية بسرعة، مثل الصين والهند، اللتين لم تكونا أحد الأطراف في معاهدة كيوتو. على الرغم من أن بعض البلدان (كالمملكة المتحدة) قد حققت تقدماً كبيراً في تحقيق أهداف كيوتو، إذ تم ذلك على نحو كبير نتيجة انتشار التبديل من وقود الفحم الحجري إلى الغاز الطبيعي من أجل

توليد الطاقة الكهربائية. لذلك فإن مساهمة الوقود في توليد الطاقة الكهربائية بالفحم الحجري أو الغاز الطبيعي في المملكة المتحدة هي الآن حوالى 40 في المئة تقريباً لكل منهما، بينما في عام 1990 كان لا يوجد، بشكل رئيس، محطات غازية لتوليد الطاقة الكهربائية. يبيّن الشكل (3-10) الانبعاثات السنوية لغاز CO_2 في المملكة المتحدة خلال الفترة الزمنية 1990 - 2000، كما نُقلَ إلى (UNFCCC).



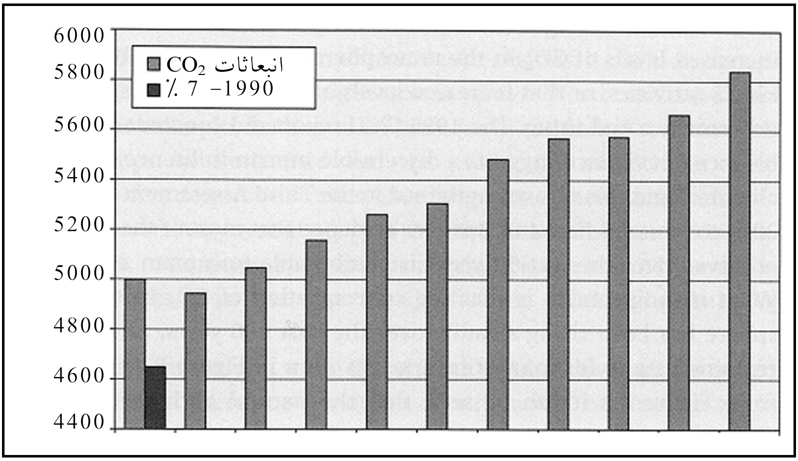
الشكل (3-10): انبعاثات غاز CO_2 في المملكة المتحدة - 1990 - 2000

المصدر: (UNFCCC).

باعتبار أن غاز CO_2 يمثل حوالى 70 في المئة من التأثير الكامن لرفع درجة حرارة الأرض بفعل انبعاثات غازات الدفيئة عالمياً، لذلك يعتبر دليلاً مهماً من أجل تحقيق أهداف معاهدة كيوتو. كما يتبيّن أيضاً على طرف اليسار من الشكل (3-10) هدف كيوتو للمملكة المتحدة، الذي هو 12.5 في المئة تحت مستويات 1990 من أجل كافة غازات الدفيئة، بالنسبة إلى انبعاثات غاز CO_2. باستثناء سنة أو سنتين، يمكن الملاحظة أنه وُجد تناقص ثابت في انبعاثات غاز CO_2

على مدى عقدٍ من الزمن (حيث أدى انخفاض درجة الحرارة إلى مستوى أقل من معدلاتها خلال شتاء 1995 - 1996، إلى ارتفاعات حادة في انبعاثات عام 1996). يبدو أن مستويات الانبعاثات قد بدأت بالتحرك إلى الأعلى ثانيةً في عام 2000، لكن قريباً سوف نرى إذا كان هذا الاتجاه هو طويل الأمد أم لا، أو أن هدف كيوتو للمملكة المتحدة سوف يتم تحقيقه في الإطار الزمني 2008 - 2012 للاتفاق.

تم تنفيذ انتشار استبدال الوقود، بشكل رئيس، بسبب الكلفة المنخفضة لبناء محطات كهربائية تعمل على الغاز الطبيعي مقارنةً بتلك التي تعمل على الفحم الحجري، وكذلك بسبب الكلفة المنخفضة نسبياً للغاز الطبيعي في زمن بناء هذه المحطات خلال التسعينيات من القرن الماضي. وقد أدى المحتوى المنخفض للكربون في الغاز الطبيعي بالإضافة إلى الكفاءة العالية لمحطات الطاقة الكهربائية ذات التوربين الغازي ذي الدارة المركّبة، الى تخفيض كبير في انبعاثات غاز CO_2. ومع الارتفاع السريع لأسعار الغاز في السنوات الأخيرة والخوف من تناقص مصادر الغاز الطبيعي، يمكن أن يصبح هذا الاستبدال في الوقود قراراً ضعيفاً وقصير الأمد. يمكن أيضاً أن يصبح الاستعمال الكبير للغاز الطبيعي من أجل توليد الطاقة الكهربائية مقصور النظر في العقود القادمة عندما يصبح الغاز الطبيعي، الذي هو الوقود الأفضل لتدفئة المباني المنزلية والتجارية، مثلاً، صعب المنال، ونتيجة ذلك تزداد أسعاره فعلياً. في بعض البلدان، مثل كندا التي تعتمد على الطاقة المائية في معظم إنتاجها من الكهرباء، لديها منظور محدود جداً في ما يخص استبدال الوقود، وبالتالي هناك تقدم قليل جداً في تحقيق أهداف معاهدة كيوتو. في الولايات المتحدة، على الرغم من حصول بعض التغيير في الوقود إلى الغاز الطبيعي، فإن هذا التغيير لم ينتشر كما في المملكة المتحدة، حيث يعود ذلك جزئياً إلى مصادر الغاز المحدودة وازدياد الأسعار. يبيّن الشكل (3-11)



الشكل (3-11): انبعاثات غاز CO_2 في الولايات المتحدة - 1990 - 2000

المصدر: UNFCCC.

انبعاثات غاز CO_2 السنوية في الولايات المتحدة خلال الفترة الزمنية 1990 - 2000 ، كما هو موثّق لدى (UNFCCC). توقف هدف كيوتو في المفاوضات الأخيرة عند 7 في المئة تحت مستويات 1990 للسنوات 2008 - 2012، على الرغم من أنه لم يتم في النهاية توقيع الاتفاق من قبل الولايات المتحدة. ويمكن ملاحظة أن هناك تزايداً ثابتاً في الانبعاثات على مدى السنوات العشر هذه، بحيث وصلت انبعاثات غاز CO_2 عند عام 2000 إلى حوالى 17 في المئة أعلى من مستوى 1990. ما يعني أن مستوى إنتاج غازات الدفيئة في الولايات المتحدة يجب تخفيضه إلى حوالى 20 في المئة عن مستوى عام 2000، أي من 5840 مليون طن ليصل إلى 7 في المئة تحت مستوى عام 1990، أي إلى 4649 مليون طن، بقيمة وسطية خلال السنوات 2008 - 2012. نظراً إلى الفترة الزمنية القصيرة المتبقية، يبدو أنه من غير المحتمل جداً تحقيق هدف كيوتو بدون تأثير جدي في التنافسية العالمية للولايات المتحدة.

أخيراً، الملاحظ أن الفكرة بأن المستويات الزائدة لغاز CO_2 في الغلاف الجوي هي أولاً عائدة إلى النشاط البشري غير مشتركة بين جميع العلماء، أو أن المستويات الزائدة لهذا الغاز في الغلاف الجوي هي شيء سيىء بالضرورة. لم يتوصل تقرير IPCC-1995 إلى الاستنتاج أن «توازن الأدلة يقترح تأثيراً بشرياً واضحاً في المناخ العالمي»، وقد دُعمت هذه النتيجة في تقرير الدراسة الثالث للعام 2001 إلى أنه «يوجد دليل جديد وقوي بأن معظم التسخين الملحوظ على مدى الخمسين سنة الأخيرة عائد إلى النشاط البشري». أما ما لا شك فيه، فهو أن تركيز غاز CO_2 في الغلاف الجوي ما زال يرتفع بثبات على مدى المئتي سنة الماضية، بعدما بقي ثابتاً لقرون عديدة، كما هو مبين في الشكل (3-4). ويمكن أن نلاحظ من الشكل (3-2)، أن التبادلات الطبيعية لغاز CO_2 بين الغلاف الجوي والمحيطات، وبين الغلاف الجوي والغطاء النباتي العالمي هي أكبر بحوالى عشر مرات من انبعاثات غاز CO_2 بسبب الإنسان. بالتالي، يمكن لأي كان أن يستنتج بأن اضطرابات صغيرة في هذه التبادلات الطبيعية يمكن أن تكون مهمةً في تحديد محصلة امتصاص الغلاف الجوي لغاز CO_2 بقدر أهمية الإسهامات البشرية. حتى إن بعض العلماء ادّعى أنه بسبب كون غاز CO_2 مُخصِّباً طبيعياً للنبات، فإن المستويات الزائدة سوف تدعم الإنتاج العالمي للكتلة الحيوية، وتُحدث اسهاماً إيجابياً للحياة الجيدة على كوكب الأرض. طالما أن هذه الأفكار لا تعكس الرؤية العالمية السائدة، هناك نقاش كبير حول السبب الحقيقي لارتفاع درجة حرارة الأرض، ويبدو أن هناك حاجة لبحوث أكثر قبل أن نستطيع الاستنتاج بشكل محدد بأن تزايد درجة حرارة الأرض هو نتيجة النشاط البشري. وللأسف، لأن الولايات المتحدة التي تعتبر أكبر اقتصاداً عالمياً، أعلنت أنها لن تُوقع اتفاقية كيوتو، فإن المُناظرة تبدو غالباً سياسية أكثر منها علمية بطبيعتها.

3. 3. التكيّف والتلطيف

تمَ اقتراح كل من التكيّف (Adaptation)، الذي من خلاله تتعلم البشرية ببساطة أن تتكيّف مع المناخ العالمي المُتغير، والتلطيف (Mitigation)، الذي تؤخذ من خلاله الإجراءات للحد من انبعاثات غاز CO_2. على الرغم من أن التكيّف ليس بالاستراتيجية المفضّلة عند معظم العلماء والمهندسين وراسمي السياسات، هناك جدال يقول إن الجنس البشري قابل للتكيّف، ويستطيع دائماً تعلُّم كيفية العيش تحت ظروف جديدة إذا لم تكن قاسية جداً ولم تحدث بسرعة كبيرة. مثلاً، طالما تم التوقع عن طريق (IPCC) بأنه سوف يكون هناك تزايد في درجة حرارة الأرض ما بين 1.4 و5.8 درجة مئوية على مدى السنوات المئة التالية، فإن البعض يُجادل بأن مجمل هذا التغير لن يكون بالضرورة مأسوياً بالنسبة إلى الجنس البشري. حيث إنه عند الحد الأعلى لدرجة الحرارة يمكن أن تصبح الحياة لا تحتمل بالنسبة إلى الذين يعيشون في المناطق الصحراوية أو قربها، إلا أن ذلك يمكن أن يؤدي إلى امتداد فصل الزراعة في مناطق من شمال كندا وروسيا مثلاً، وبالتالي إلى ازدياد المقدرة على زراعة محاصيل إضافية لكلٍ من الغذاء وإنتاج الوقود الحيوي. على الرغم من إنجاز دراسات نهائية قليلة، فإن المُدافعين عن استراتيجية التكيّف سوف يقولون إن الكلفة المادية والبشرية للتكيّف، وبالطبع لتنقل الناس حول العالم، قد تكون أقل من كلفة تخفيض انبعاثات غاز CO_2 عالمياً بنحوٍ كبير.

في الوقت الحاضر، طالما تستمر المناظرة العلمية حول تسخين الأرض، يوجد عدد من إجراءات التلطيف أو «تنقيص الكربون» التي اتخذتها بلدان على صعيد عالمي لتحاول أن تحد من انبعاثات غاز CO_2. إن توقيع معاهدة كيوتو سوف يكفل أن الموقّعين على الاتفاقية سوف يعتمدون سياسات وإجراءات تهدف إلى تحقيق مستويات تخفيض غاز CO_2 المطلوب منهم خلال الفترة 2008 - 2012. إن بعض الإجراءات المُتخذة لتخفيض الكربون، أو على الأقل لأنها

مأخوذة بعين الاعتبار، تتضمن إدخال معايير أشد صرامة لاستهلاك الوقود في السيارات الحديثة، وإجراءات لزيادة كفاءة العمليات الصناعية كثيفة الطاقة والتوليد الحراري للطاقة الكهربائية، وإجراءات الحفاظ على الطاقة مثل تحسين العزل الحراري للمنازل والمباني التجارية. يمكن أيضاً أن يؤدي التحول من توليد الكهرباء بواسطة الفحم الحجري إلى توليدها بواسطة الغاز الطبيعي، أو حتى بواسطة الطاقة النووية إلى تخفيض كبير في انبعاثات غاز CO_2. في بعض الحالات، يستمر تكثيف إعادة زرع الغابات ليس فقط لاستبدال الأشجار المقطوعة من أجل إنتاج الأخشاب الصناعية، ولكن أيضاً لتعزيز دور الكتلة الحيوية العالمية «الماصّة» لغاز CO_2. وكما رأينا، سوف يكون صعباً بالنسبة إلى معظم الدول الصناعية أن تحقق أهداف كيوتو في الزمن المتبقي القصير نسبياً قبل نهاية الفترة 2008 - 2012.

المراجع

Books

Houghtom, J. *Climate Change: The Complete Briefing*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2004.

Periodicals

Kasting, James F. "The Carbon Cycle Climate and the Long-Term Effects of Fossil Fuel Burning." *Consequences: The Nature and Implication of Environmental Change:* vol. 4, no. 1, 1998.

Reports

The 22nd Report: Energy - The Changing Climate. London: Royal Commission on Enviromental Pollution, 2000.

Intergovernmental Panel on Climate Change. "IPCC Second Assesment: Climate Change 1995." Geneva, Switzerland, IPCC, 1995.

__________. "IPCC Third Assesment Report: Climate Change."

Edited by R.T. Watson and the Core Writing Team, Geneva, Switzerland, IPCC, 2001.

Websites

California Air Resources Board (2005). <http://arb.ca.gov/homepage.htm>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2005). <http://www.ipcc.ch>.

International Energy Agency (2005). <http://library.iea.org/index.asp>.

United Nations Famework Convention on Climate Change (2005). <http://unfccc.>.

US Depatment of Energy. Energy Information Agency. <http://www.eia.doe.gov>.

US Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov>.

القسم الثاني

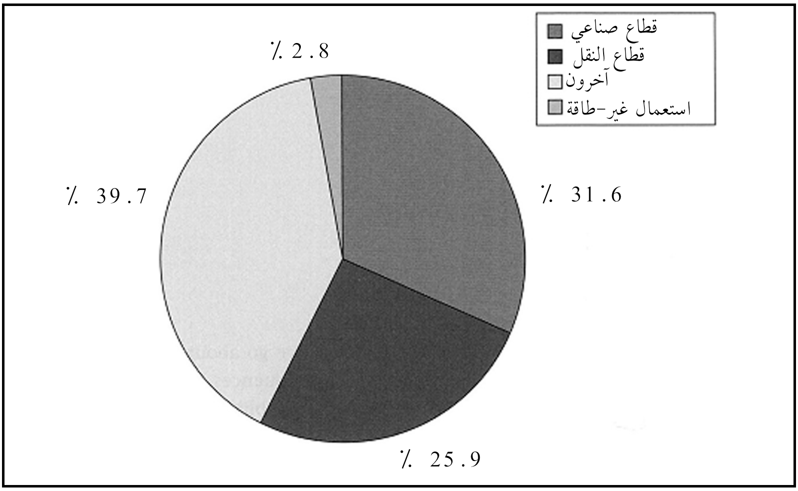
توازن الطلب العالمي
على الطاقة مع المخزون

4 ـ الطلب العالمي على الطاقة

إننا نستخدم الطاقة بأشكال متعددة ومختلفة خلال حياتنا اليومية، وقلما نتوقف لنفكر حول نتائج فعل ذلك. لا نحتاج الطاقة فقط من أجل حاجاتنا المنزلية، لكن أيضاً لتزويد مصانعنا بالوقود وتزويد الطاقة المحركة لقطاع النقل، سواءً البرّي أم السككي أم الجوي أم البحري. إن الاستهلاك الإجمالي العالمي للطاقة في عام 2002 كان أعلى بقليل من 400×1015 وحدة حرارية إنجليزية (Btu)، أو 10 آلاف مليار طن نفط مكافئ (10 Gtoe)(*). ويُبيّن الشكل (4-1) توزيع هذا الطلب بحسب كل قطاع اقتصادي. على الرغم من أن هذا التوزيع يتغير كثيراً من بلد إلى آخر، معتمداً في ذلك إلى حد بعيد على درجة التطور الصناعي، فإن 25 في المئة تقريباً من إجمالي الطاقة تستعمل في قطاع النقل و32 في المئة تستعمل لتزويد العمليات الصناعية، بينما الباقي يستعمل في مجالات عدة، منها تدفئة الأبنية العامة والخاصة. تستعمل أيضاً كمية قليلة من مصادر الطاقة الأوّلية من أجل الاستعمالات المدعوة بـ «غير المرتبطة بالطاقة» كالمواد الأوّلية الكيميائية المستخدمة في إنتاج البلاستيك.

على الرغم من صعوبة الحصول على تصنيف أكثر تفصيلاً لاستهلاك الطاقة بحسب كل قطاع اقتصادي على أساس عالمي مقارنةً بما يبيّنه الشكل (4-1)، تُزوّد معظم البلدان الصناعية بيانات منفصلة لكل من القطاعين التجاري والمنزلي. مثلاً، يبيّن الشكل (4-2) طلب

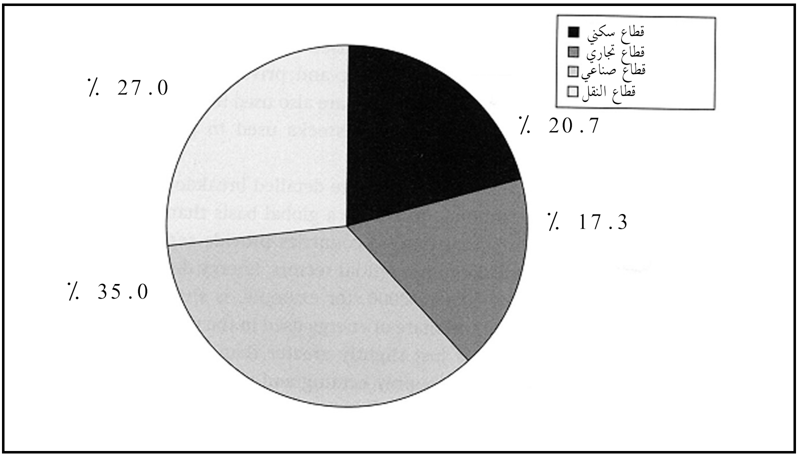
(*) Gtoe: جيغا طن نفط مكافئ.



الشكل (4-1): الطلب العالمي على الطاقة بحسب القطاعات الاقتصادية - 2002.

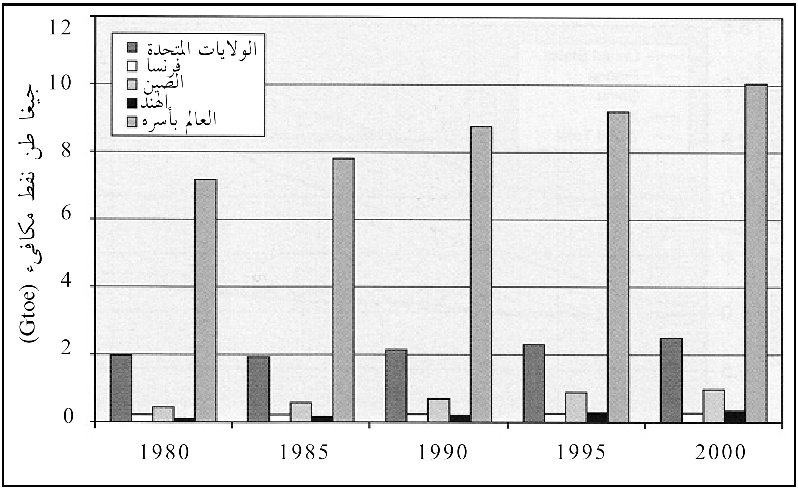
آخرون - تتضمن الأبنية التجارية والمنزلية.

المصدر: مبني على بيانات من وكالة الطاقة الدولية: World Energy Outlook.



الشكل (4-2): الطلب العالمي على الطاقة في الولايات المتحدة بحسب القطاعات الاقتصادية - 2000.

المصدر: مبني على بيانات من إدارة معلومات الطاقة: Annual Energy Review.

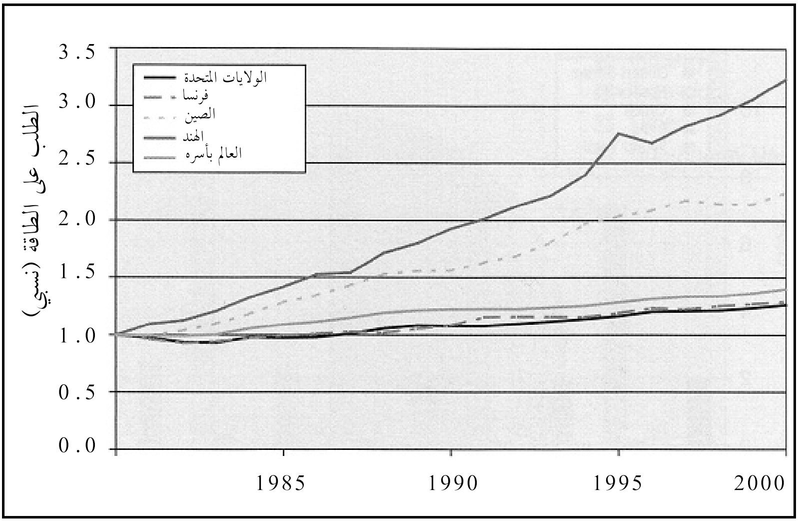


الشكل (4-3): النمو في إجمالي الطلب على الطاقة - 1980 - 2000 (Gtoe).

المصدر: مبني على بيانات من إدارة معلومات الطاقة: International Energy Annual 2002.

الطاقة بحسب القطاعات الاقتصادية بالنسبة إلى الولايات المتحدة في عام 2000. يمكن الملاحظة أن حصة الطاقة المستخدمة في قطاعي النقل والصناعة هي أعلى بقليل من مقدار الحصة العالمي. إن طلب الطاقة للتدفئة والتبريد وتشغيل الأجهزة والأدوات المنزلية في القطاع المنزلي يساوي تقريباً ذلك المطلوب لتأمين التدفئة والتبريد وتشغيل الأجهزة المكتبية في المباني التجارية.

ولا يزال الطلب العالمي على الطاقة في ازدياد ثابت مع الزمن منذ بداية الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر. يبيّن الشكل (4-3) تطور هذا الازدياد في الطلب للسنوات العشرين بين عامي 1980 و2000 بالنسبة إلى العالم ككل، وبالنسبة إلى بعض الدول. لقد كان الاستهلاك العالمي لكل أشكال الطاقة الأولية في عام 2000 حوالى 10 جيغا طن نفط مكافئ، حيث كانت الولايات المتحدة مسؤولة عن 25 في المئة تقريباً من إجمالي الطلب العالمي. وكان نمو الطلب



الشكل (4-4): الطلب على الطاقة (نسبي) - 1980 - 2000 (1=1980)

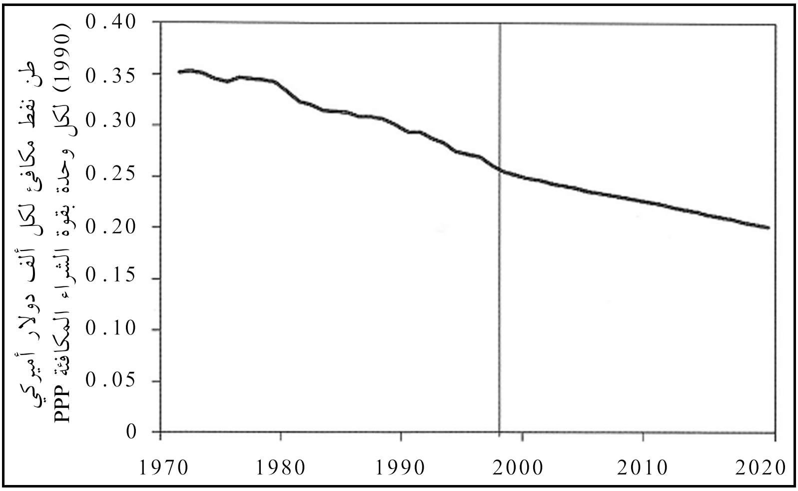
المصدر: مبني على بيانات من إدارة معلومات الطاقة: International Energy Annual 2002.

العالمي على الطاقة خلال هذه الفترة القصيرة حوالى 40 في المئة، كما هو ملاحظ في الشكل (4-3)، على الرغم من أن معدّل النمو في بعض الدول كان أعلى بكثير. وطالما أن إجمالي الطلب على الطاقة في الصين والهند، مثلاً، أقل بكثير من الطلب في الولايات المتحدة، فإن معدّل النمو في الطلب بالنسبة إلى هذين البلدين كان كبيراً جداً خلال هذه الفترة.

يمكن، من خلال الشكل (4-4)، مقارنة نمو الطلب النسبي على الطاقة (باعتبار الطلب لعام 1980 يعادل 1.0) للبلدان نفسها أعلاه، خلال فترة العشرين سنة المبيّنة، مع نمو الطلب العالمي الإجمالي. يمكن الملاحظة أن البلدان الصناعية الرئيسة مثل الولايات المتحدة وفرنسا، كان لديها نمو معتدل خلال هذه الفترة، لكن في حالة البلدين الأكثر نمواً، الصين والهند، كان النمو أعلى بكثير. لقد كان متوسط النمو السنوي المركّب خلال فترة العشرين سنة هذه 1.2

في المئة في الولايات المتحدة و1.75 في المئة في العالم ككل، لكنه كان 4.1 في المئة في الصين و6 في المئة في الهند. وسوف تنتج من هذه المعدلات العالية جداً للنمو في الاقتصادات الصاعدة الكبيرة، ضغطاً هائلاً على المصادر العالمية للطاقة في السنوات القادمة. وإذا كان المطلوب المحافظة على معدّل نمو 6 في المئة في الهند مثلاً، فإن إجمالي الطلب على الطاقة سوف يتضاعف كل 12 سنة. وإذا استمرت هذه المعدلات على ثباتها حتى منتصف هذا القرن، فإن الصين سوف تتخطى الولايات المتحدة كأضخم مستهلك للطاقة في حلول العام 2030، وكذلك الهند سوف تتخطى الولايات المتحدة في العام 2043. كما ستنتج المعدلات العالية للطلب على الطاقة ضغطاً متزايداً على البيئة العالمية ما لم يتم اتخاذ تدابير لتغيير ملحوظ في أنماط الاستهلاك والطريقة التي نستخدم بها مصادرنا الأوّلية للطاقة.

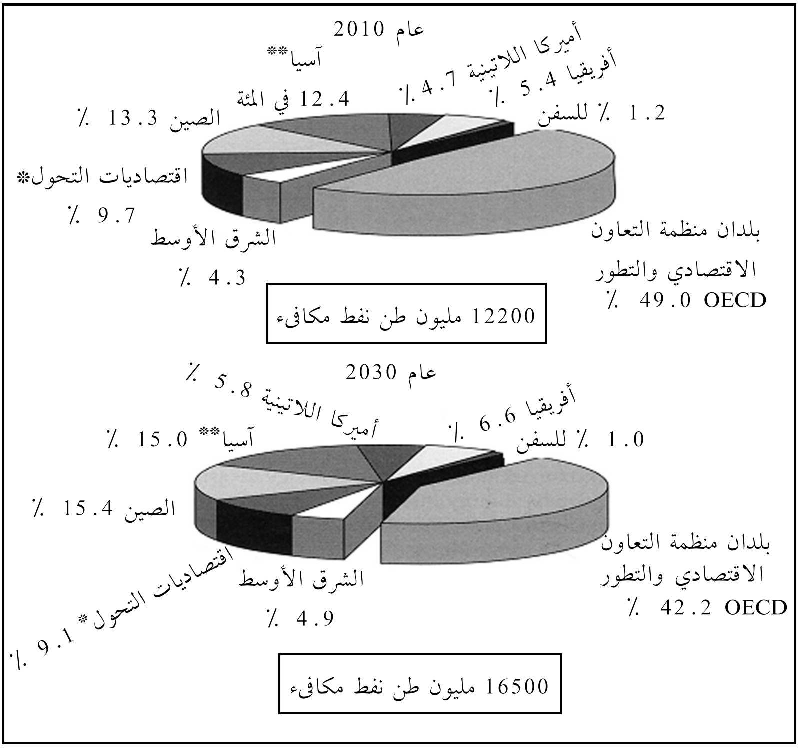
تاريخياً، هناك ارتباط قوي بين الناتج الإجمالي المحلي (Gross Domestic Product GDP) واستهلاك الطاقة. بمعنى آخر، مع التوسع الاقتصادي يوجد تضخم موازٍ في كمية الطاقة المستهلكة، وتدعى النسبة بين استهلاك الطاقة وهذا الناتج (GDP) «كثافة الطاقة». تعتمد «كثافة الطاقة» لبلد ما على كل من الكفاءة الإجمالية لاستخدام الطاقة وعلى البنية الاقتصادية وعلى جغرافية هذا البلد. من المتوقع أن البلدان ذات المناخ البارد، وتلك ذات المصادر الصناعية الكثيفة والمهمة للطاقة، سوف يكون لديها عموماً كثافة طاقة أعلى من تلك البلدان التي تقع في مناطق أدفأ وتلك التي تعتمد كثيراً على قطاع الخدمات. مثلاً، على الرغم من أن كندا هي بلد ذات كفاءة طاقة عالية نسبياً، فإن لديها إحدى كثافات الطاقة الأعلى في العالم. هذا الارتباط القوي بين إجمالي النمو الاقتصادي واستهلاك الطاقة الأوّلية كان أحد العوامل الرئيسة المؤثرة في الاستهلاك العالمي للطاقة وفي الإنتاج المرافق لغازات الدفيئة. وقد حصل في السنوات الأخيرة إضعاف



الشكل (4-5): كثافة الطاقة الأولية العالمية.

المصدر: وكالة الطاقة الدولية: World Energy Outlook-2000 .

لهذا الارتباط مع إدخال العديد من الإجراءات بالنسبة إلى كفاءة الطاقة لدى تحويل الطاقة الأوّلية إلى حوامل ثانوية للطاقة كالكهرباء، وأيضاً مع التحسينات في إدارة الاستهلاك والطلب لتخفيض الاستهلاك في الأبنية مثلاً. يمكن ملاحظة ذلك في الشكل (4-5) (IEA, 2000)، الذي يبيّن أطنان النفط المكافئة (toe) المستخدمة عالمياً لكل ألف دولار بوحدة القوة الشرائية المكافئة (Purchasing Power Parity - (PPP))، التي توازن القوة الشرائية لعملات مختلفة نسبةً إلى الدولار الأميركي. ومن الملاحظ أنه خلال فترة ثلاثين عاماً من 1970 حتى 2000 حصل تناقص ثابت لهذه النسبة من 0.35 في 1970 إلى 0.25 تقريباً في 2000، أي بمعدّل 29 في المئة. من غير الواضح إذا كان ممكناً الحفاظ على هذا النوع من التناقص الثابت، على الرغم من أن الوكالة الدولية للطاقة (IEA) توقعت بأن كثافة الطاقة سوف تستمر بالانخفاض إلى حوالى 0.02 في عام 2020، كما هو مبيّن في الشكل (4-5). إذا كان من الممكن الحفاظ



الشكل (4-6): طلب الطاقة الأوّلية العالمي المُسقط بحسب المنطقة في عام 2010 و2030 بالمليون طن من النفط المكافئ.

المصدر: مبني على بيانات من وكالة الطاقة الدولية: Key World Energy Statistics (2004).

على هكذا انخفاض مستمر في كثافة الطاقة، خصوصاً في الاقتصادات الصاعدة والنامية بسرعة، فإن ذلك بالتأكيد سوف يساعد على إنقاص أثر النمو الاقتصادي في استهلاك الطاقة، وفي انبعاثات غازات الدفيئة أيضاً.

يُبيّن الشكل (4-6) تقديرات الوكالة الدولية للطاقة بالنسبة إلى الطلب على الطاقة الأوّلية بحسب المنطقة، في العامين 2010 و2030. يُمثل الازدياد 35 في المئة المُقدّر في الطلب خلال هذه

الفترة معدل نمو مركّب سنوي مقداره حوالى 5.1 في المئة. على الرغم من أنه تم التوقع بنمو معتدل ومستمر بالنسبة إلى بلدان (OECD)، من المتوقع أن تهبط الحصة الإجمالية للطاقة الأوّلية في هذه المنطقة، بينما يتبيّن أن هناك ازدياداً في حصة الطلب على الطاقة الأوّلية بالنسبة إلى الصين وبلدان آسيوية أخرى. يعكس ذلك ظهور النمو القوي في الطلب بالنسبة إلى كل أنواع الطاقة في السنوات الأخيرة في الصين والهند، كما هو مبيّن في الشكل (4-4). على الأرجح، سوف يكون هذا الطلب القوي جداً في هذه الاقتصادات الصاعدة موضوعاً مسيطراً، على الأقل حتى منتصف القرن الحادي والعشرين، وربما بعد ذلك. وذلك نتيجة الازدياد السريع في التصنيع في هذه البلدان، بالإضافة إلى رغبة شرائح كبيرة من السكان بالاستفادة من تسهيلات النقل المُحسّنة، إما بواسطة النقل العام أو بالاختيار الواسع الانتشار للسيارات الخاصة، كما هو الحال في أغلب الدول المتطوّرة.

المراجع

Books

International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook*. Paris, France: IEA, 2000.

__________. *Key World Energy Statistic*. Paris, France: IEA, 2004.

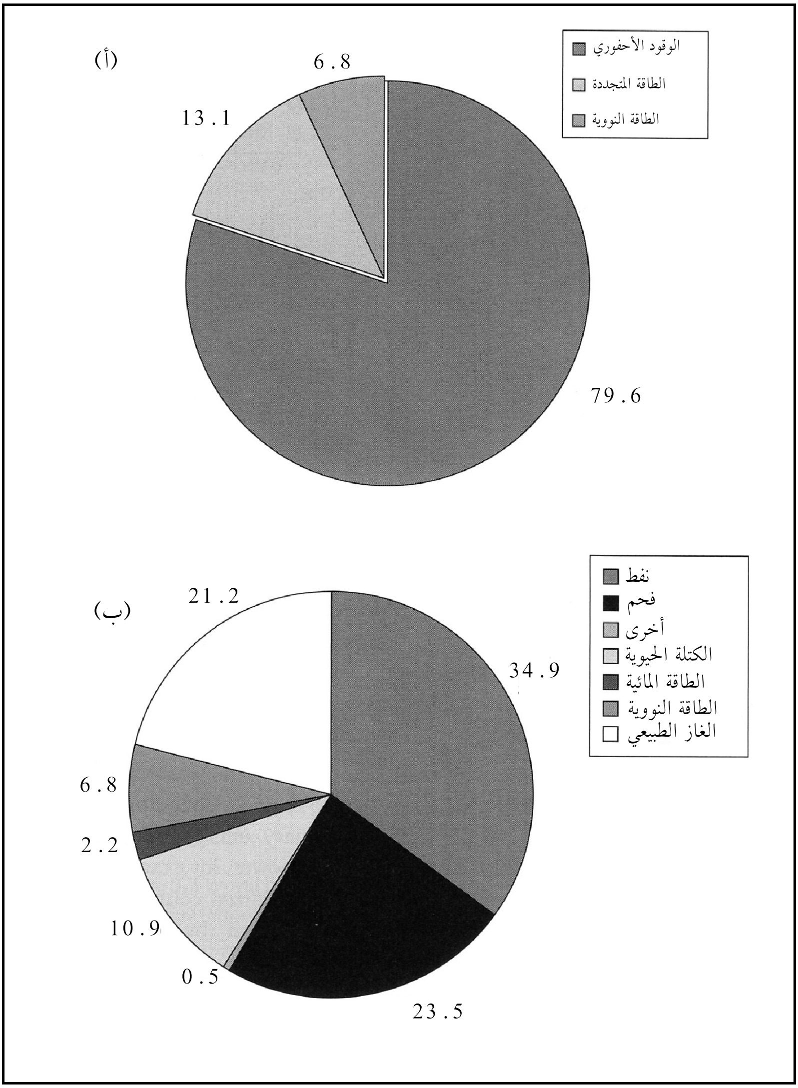
Websites

US Department of Energy, Energy Information Agency (2005). <http://www.eia.doe.gov>.

5 ـ مخزون الطاقة العالمي

5. 1. مصادر الطاقة العالمية

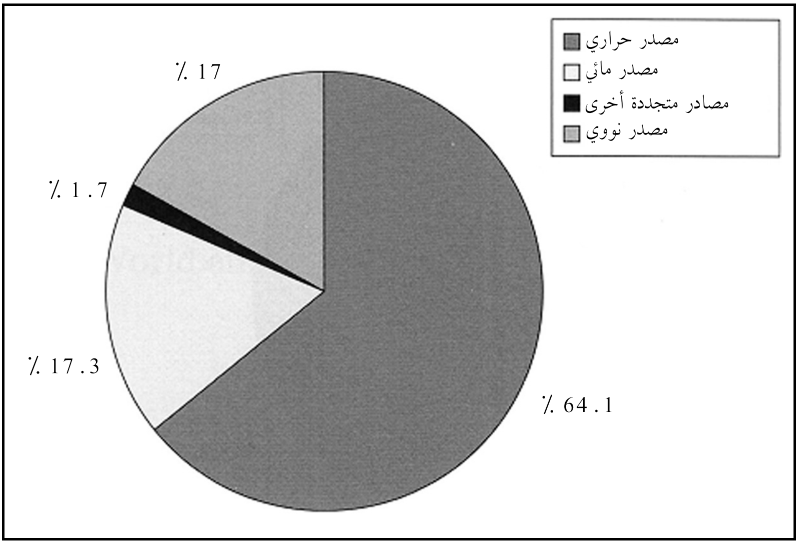
في الفصل الثاني لاحظنا أنه يوجد فقط ثلاثة مصادر للطاقة الأوّلية، الوقود الأحفوري، والطاقة المتجدّدة، والطاقة النووية. أما الاستهلاك العالمي للطاقة، المجزّأ إلى هذه الفئات، فهو مبيّن في الشكل (5-1-أ). من الملاحظ أن حوالى 80 في المئة من جميع احتياجاتنا للطاقة الأوّلية يتم تأمينها من الوقود الأحفوري. كذلك جُزِّء توزّع الطاقة بحسب المصدر في الشكل (5-1-ب)، الذي يبيّن أن أهم مركّبات الوقود الأحفوري من إجمالي المخزون العالمي هي النفط، يتبعها الفحم الحجري، وأخيراً الغاز الطبيعي. أما في ما يخص قطاع الطاقة المتجددة، لا شك في أن المركّبة الأهم، هي المواد المتجددة والقابلة للاحتراق والنفايات التي تتضمن نفايات الخشب والمحلول الأسود (Black liquor) المستخدم في تغذية المراجل لدى صناعة الورق مثلاً، بالإضافة إلى الوقود الحيوي الآخر كالحطب الذي يُجمع باليد في الدول النامية. أما ما تبقى من الطاقة المتجدّدة المزوّدة في عام 2002 فيتألف من الطاقة الكهرومائية، المسؤولة عن 2.2 في المئة من الطلب العالمي، بينما حوالى 5.0 في المئة من الطلب العالمي كان مؤمّناً من الطاقات الرياحية والشمسية والحرارية الأرضية (كما هو مبيّن في الشكل (5-1-ب) تحت بند «أُخرى»). تُوضح هذه الأشكال الاعتماد الغالب الذي يضعه العالم على الوقود الأحفوري ليلبّي حاجاتنا من الطاقة. على الرغم من أن النفط الخام هو المصدر الأكبر للطاقة، وأنه يستخدم بشكل



الشكل (5-1): استهلاك الطاقة الأوّلية العالمي بحسب المصدر - 2002.

CRW = النفايات والمصادر المتجددة القابلة للاحتراق؛ الأخرى: الجيوحرارية، الشمسية، والرياحية... الخ.

المصدر: مبني على بيانات من إدارة معلومات الطاقة: International Energy Annual (2002).



الشكل (5-2): توليد الكهرباء عالمياً بحسب المصدر - 2001.

المصدر: مبني على بيانات من إدارة معلومات الطاقة: International Energy Annual 2002.

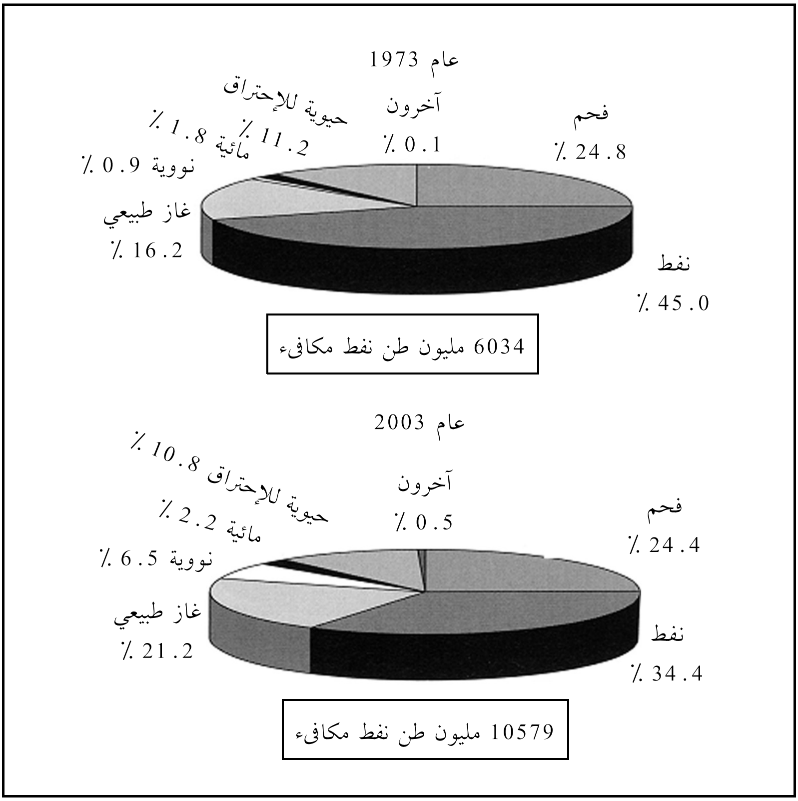
أساسي لتزويد قطاع النقل، فإننا نستهلك أيضاً كميات كبيرة من الغاز الطبيعي والفحم الحجري لتأمين التدفئة وتوليد الكهرباء بشكل رئيس.

إن الكهرباء ليست مصدر طاقة أوّلياً، لكنها بالأحرى «حامل للطاقة» كما شاهدنا في الفصل الثاني. وإن عملية توليد الكهرباء هي مُستهلك رئيس للطاقة الأولية، إذ إن معظم استهلاك العالم من الفحم الحجري وبعض الغاز الطبيعي والطاقة النووية والكهرومائية كلها تُستخدم لإنتاج الكهرباء. على الرغم من أن بعض النفط يستعمل أيضاً لإنتاج الكهرباء، فإن ذلك يقتصر عادةً على المنشآت الصغيرة في المناطق البعيدة، أو عندما تكون المصادر الأخرى غير متوافرة بيسر. يبيّن الشكل (5-2) مساهمة الوقود في إنتاج الكهرباء عالمياً عام 2001، كما ورد في تقرير لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة. إن ثلثي إجمالي إنتاج الكهرباء تقريباً يأتي من محطات الطاقة الحرارية

التقليدية التي تعمل على الوقود الأحفوري، بينما تُؤمّن المحطات الكهرومائية والنووية كلّ منها 17 في المئة تقريباً من إجمالي الطلب على الكهرباء. أما النسبة المتبقية، وهي بالضبط دون 2 في المئة من إجمالي إنتاج الكهرباء العالمي الكلي، فيتم الحصول عليها من المصادر المتجددة الأخرى، كالمصادر الجيوحرارية، والشمسية، والرياحية، ومصادر الخشب والنفايات. بالطبع، يتغير هذا الخليط من منطقة إلى أخرى، مُعتمداً على التوافر المحلي وكلفة مصادر الطاقة الأوّلية المختلفة وعلى حالة التطور الاقتصادي. مثلاً، تميل الطاقة النووية لتكون مركّزة بشكل طبيعي في الدول الصناعية، بينما يكون توليد الطاقة الكهرومائية مقيّداً باعتبارات جغرافية.

على الرغم من أن كثافة الطاقة ما زالت تنخفض بثبات على مدى الثلاثين سنة الأخيرة، كما كان ملاحظاً في الشكل (4-5)، فإن إجمالي النمو في النشاط الاقتصادي أدّى إلى تزايد ثابت في الاستهلاك العالمي لجميع أشكال الطاقة الأوّلية.

أما مشاركة السوق في مخزون الطاقة الأوّلية عالمياً بحسب المصدر، فهي مبيّنة في الشكل (5-3) بالنسبة إلى السنتين 1973 و2003. خلال هذه الفترة كان النمو في إجمالي مخزون الطاقة 70 في المئة تقريباً، ممثلاً بمعدّل نمو مركّب سنوي 1.8 في المئة (IEA, 2004). على الرغم من أن النمو في مشاركة السوق ببعض مصادر الطاقة الأوّلية، كالفحم الحجري والمواد المتجدّدة القابلة للاحتراق والنفايات، كان معتدلاً نسبياً في السنوات الأخيرة، فقد كان هناك ازدياد ثابت في مشاركة السوق بمصادر أخرى كالغاز الطبيعي. هذه خصوصاً هي حالة الغاز الطبيعي، حيث إنه في كثير من الدول المتطوّرة كالولايات المتحدة والمملكة المتحدة، هناك سعي حثيث إلى إحلال الغاز الطبيعي محل الفحم الحجري من أجل توليد الطاقة الكهربائية. وقد دُفع إلى ذلك جزئياً نتيجة الرغبة في خفض



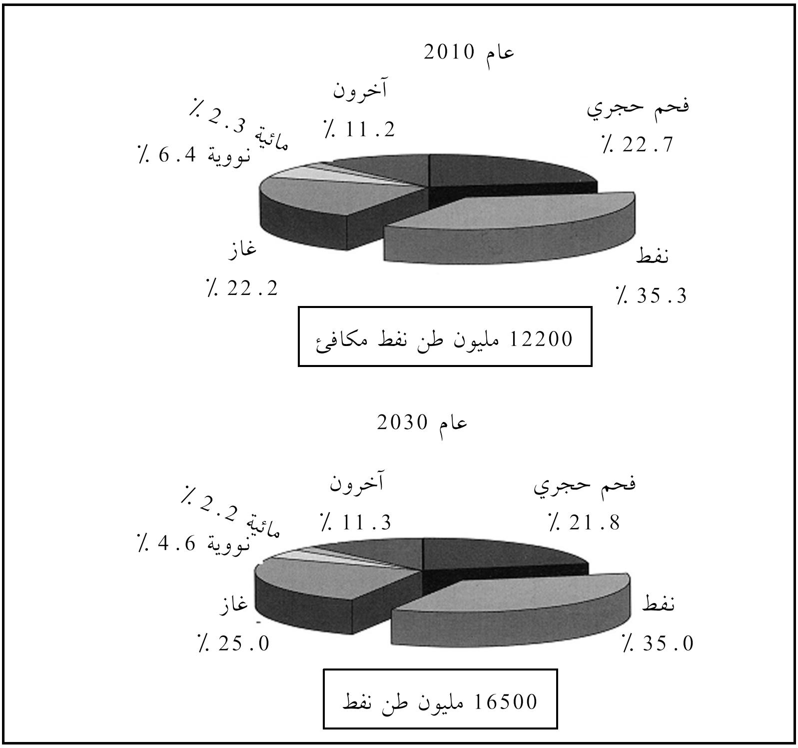
الشكل (5-3): استهلاك الطاقة الأوّلية عالمياً بحسب المصدر 1973 - 2003 (Mtoe).

المصدر: مبني على بيانات من وكالة الطاقة الدولية- International Energy Agency (IEA), Key World Energy Statistics (London: IEA, 2004).

التلوث من احتراق الفحم الحجري من جهة، ومن جهة أخرى نتيجة الكلفة المُنخفضة نسبياً والكفاءة العالية لتوليد الكهرباء عن طريق التوربينات الغازية ذات الدورة المركّبة. هناك عامل آخر يقود هذا «الاندفاع نحو الغاز»، هو التوافر الكبير للأسواق والسعر المنخفض للغاز الطبيعي. وهناك ضغط قوي حديثاً على مخزون الغاز، إلى حد ما، مع ازدياد لاحق في أسعار الغاز أدى إلى إعادة التفكير في جدوى استبدال الوقود. وعلى الرغم من أن الغاز الطبيعي

هو وقود وافر نسبياً حول الأرض، إلا أنه على الأغلب موجود بعيداً عن الأسواق، ونقله ليس سهلاً مقارنةً بالنفط. بالطبع، هذا صحيح خصوصاً بالنسبة إلى النقل عن طريق البحر على الرغم من وجود اهتمام متزايد في توسيع النقل البحري للغاز الطبيعي المُسال (LNG) من المناطق ذات الفائض الكبير في الغاز الطبيعي، مثل الشرق الأوسط، إلى مناطق ذات طلب مرتفع مثل الولايات المتحدة واليابان. لقد انخفضت فعلياً مشاركة السوق بالنفط خلال هذه الفترة، عاكسةً على الأرجح الانتقال من استخدام النفط لتوليد الكهرباء إلى أنواع أخرى من الوقود كالفحم الحجري والغاز الطبيعي، وتحسينات في كفاءة محركات المَركبات. كما حصل نمو واضح أيضاً، في مخزون الطاقة النووية من أجل توليد الكهرباء في السبعينيات وأوائل الثمانينيات من القرن الماضي، على الرغم من أن هذا النمو تباطأ الآن بشكل مثير للقلق بسبب اهتمام الناس بتأثيرات الأمان والتأثير البيئي طويل الأمد للطاقة النووية. ومع استمرار تعزيز الضغط للحد من إنتاج غاز CO_2، قد تكون هناك عودة لانتشار أوسع للطاقة النووية. سوف نناقش هذا الموضوع بعمق أكثر في الفصل الثامن.

كذلك وفَّرت وكالة الطاقة الدولية (IEA) بعض التقديرات للتزايد في الطلب على جميع أشكال الطاقة الأوّلية خلال فترة عشرين سنة من عام 2010 ولغاية 2030، كما هو مبيّن في الشكل (5–4). إن إجمالي الازدياد في الطلب على الطاقة خلال العشرين سنة هذه هو 35 في المئة تقريباً، متصاعداً من 12.2 (Gtoe) في 2010 إلى 16.5 (Gtoe) في 2030، عاكساً 1.5 في المئة كمُعدّل نمو سنوي مركّب مُفترض، إلى حد ما أقل مما حصل في الثلاثين سنة السابقة. حيث تم افتراض أن النمو على الطلب هو أعلى بالنسبة إلى بعض مصادر الطاقة بالمقارنة مع مصادر أخرى. مثلاً، تبيّن التوقعات انخفاضاً في مشاركة السوق في ما يخص الطاقة الكهرومائية حيث يعود ذلك أولاً



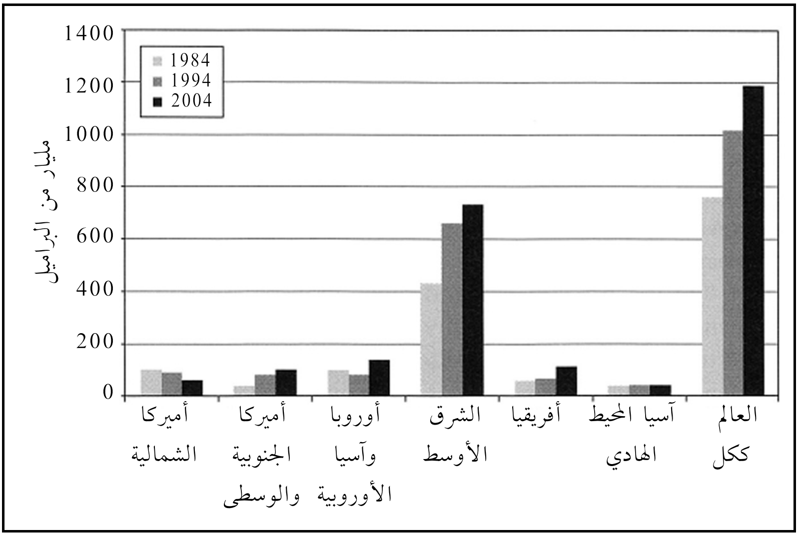
الشكل (5-4): الاستهلاك العالمي للطاقة مسقطاً بحسب المصدر حتى عام 2030 (Mtoe).

المصدر: مبني على بيانات من وكالة الطاقة الدولية: International Energy Agency (IEA), Key World Energy Statistics (London: IEA, 2004)..

إلى المقدرة المحتملة والصغيرة نسبياً لبناء مصادر كبيرة وجديدة للطاقة الكهرومائية بالقرب من مراكز الحمل الرئيس، وأيضاً إلى الانخفاض الكبير في مشاركة السوق بالنسبة إلى الطاقة النووية بسبب إدراك الناس المعادي غالباً لهذا الشكل من الطاقة. بالتالي تبقى المشاركة الكبرى المتوقعة للسوق هي الأكبر بالنسبة إلى النفط والغاز الطبيعي، حيث يدفع قطاع النقل الطلب على النفط، ويدفع كل من توليد الكهرباء وتدفئة المنازل والمكاتب والمصانع الطلب على الغاز الطبيعي.

5 .2. مصادر الوقود الأحفوري

كما رأينا، يشكّل الوقود الأحفوري المصدر الأوّلي السائد للطاقة الذي أمَّن 80 في المئة تقريباً من جميع متطلبات الطاقة العالمية في العام 2002. بما أن النفط الخام والغاز الطبيعي والفحم الحجري جميعها مصادر غير مُتجددة في الطبيعة، فإن السؤال الذي يطرح نفسه هو إلى متى نستطيع أن نستمر بالاعتماد عليها كمصادر أوّلية للطاقة. على الرغم من أن أسعار الوقود الأحفوري، خصوصاً النفط والغاز الطبيعي، ما زالت بمستويات قياسية في السنوات الأخيرة. يبيّن الطلب على هذه المصادر المهمة للطاقة إشارة ضعيفة للاعتدال، لكنه في الحقيقة يمثّل تزايداً سنةً تلوَ أخرى. وعلى الرغم من أن الفحم الحجري متوافر بشكل واسع في مناطق عديدة من العالم، فإن النفط الخام والغاز الطبيعي يتوزعان بشكلٍ متفاوت جداً، مع مصادر كبيرة من النفط مركّزة خصوصاً في الشرق الأوسط ومصادر كبيرة جداً للغاز الطبيعي في كل من الشرق الأوسط وروسيا. إن عبارة «مصادر» هي عامة نوعاً ما، فهي تتضمن عادةً «الاحتياطي المثبت القابل للاستخراج»، بالإضافة إلى تقدير لما يمكن استخراجه في المستقبل في ضوء التطوّرات التكنولوجية الجديدة في الحفر العميق مثلاً، أو وجود حالة اقتصادية جديدة تجعل المصادر غير الاقتصادية حالياً تستحق الاستخراج. وقد أُعطي تعريف أكثر دقة لـ«لاحتياطي المثبت القابل للاستخراج» بواسطة الجمعية العالمية للطاقة على أنه: «الرسم الطيني ضمن المخزون المثبت في الموقع، والذي يمكن استخراجه في المستقبل تحت الظروف الاقتصادية الحالية والمتوقعة بواسطة التكنولوجيا المتوافرة والمتواجدة». يبيّن الشكل (5-5) (المأخوذ من شركة النفط البريطانية، 2005) الاحتياطي المثبت القابل للاستخراج من النفط الخام، بمليارات البراميل، للسنوات 1984 و1994 و2004 (برميل واحد (أو Bbl) يساوي 42 غالوناً أميركياً أو 35 غالوناً إنجليزياً). من المهم



الشكل (5-5): احتياطي النفط المُثبت القابل للاستخراج 1984 - 2004.

المصدر: مبني على بيانات من: BP Statistical Review of World Energy (June 2005).

أن نلاحظ أن الاحتياطي الإجمالي في المناطق الأكبر إنتاجاً، وفي العالم ككل، قد تصاعد بشكلٍ واضح خلال هذه الفترة على الرغم من أن ذلك قد ترافق مع المستويات المتزايدة للاستهلاك، كما سنرى.

يبيّن الجدول (5-1) (IEA, 2005) تجزئة أكثر تفصيلاً للاحتياطي القابل للاستخراج بحسب البلد في عام 2000، بملايين الأطنان من النفط المكافئ (Mtoe)، وأيضاً بملايين البراميل (mmBbls). في بداية القرن الحادي والعشرين، كان إجمالي احتياطي النفط التقليدي العالمي المثبت القابل للاستخراج واحد تريليون (10^{12}) برميل تقريباً، يمكن ملاحظة أن احتياطي النفط مسيطر عليه بوضوح بواسطة الشرق الأوسط الذي يحتوي على ثلثي الاحتياطي العالمي المثبت من النفط. على الرغم من أن لدى منطقة الشرق الأوسط عدد سكانٍ قليلاً نسبياً ونشاطاً صناعياً محدوداً، إلا أنها فاعلة في منظمة الدول المصدّرة للنفط (OPEC)، وبالتالي على أسواق النفط العالمية.

الجدول (5-1): الاحتياطي العالمي المثبت القابل للاستخراج من النفط والغاز الطبيعي المُسال في عام 2000

الدولة	مليون طن نفط مكافئ	مليون برميل
أفريقيا		
الجزائر	1235	10040
مصر	529	4150
ليبيا	3892	29500
نيجيريا	3000	22500
آخرون	1466	10777
المجموع	10122	76967
أميركا الشمالية		
كندا	779	6402
المكسيك	3858	28260
الولايات المتحدة	3728	29671
آخرون	208	1417
المجموع	8573	65750
أميركا الجنوبية		
الأرجنتين	429	3054
البرازيل	1172	8415
فنزويلا	11048	76785
آخرون	721	5115
المجموع	13370	93369
آسيا		
الصين	4793	35085
الهند	645	4799
أندونيسيا	707	5203
كازاخستان	742	5417

يتبع

تابع

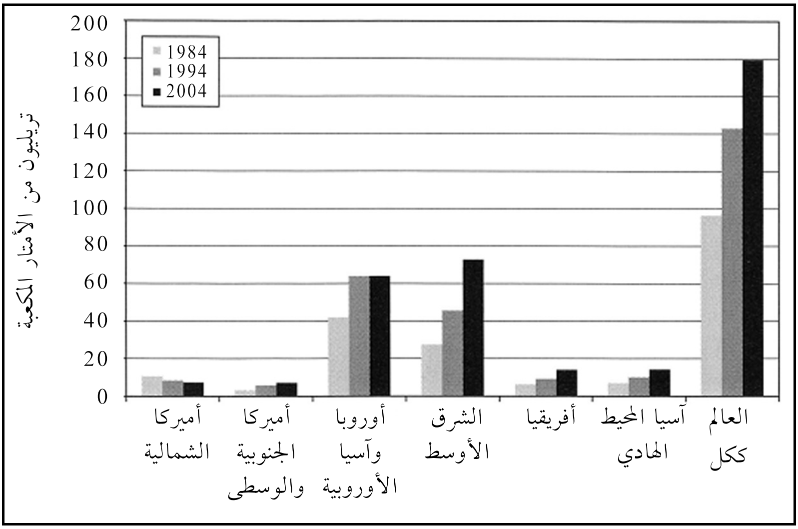
ماليزيا	513	3900
آخرون	783	5832
المجموع	8183	60236
أوروبا		
روسيا	6654	48573
نرويج	1510	11669
المملكة المتحدة	665	5003
آخرون	666	5058
المجموع	9495	70303
الشرق الأوسط		
إيران	12667	93100
العراق	15141	112500
الكويت	13310	96500
السعودية	35983	263500
الإمارات العربية	12915	98100
آخرون	2226	16553
المجموع	92242	680253
أوقيانيا - جزر المحيط الهادي		
أستراليا	445	3848
آخرون	57	439
أوقيانيا - جزر المحيط الهادي	502	4287
الإجمالي العالمي	142487	1051165

ملاحظات:

- إن احتياطي الرمال والصخور النفطية غير مشمول في الجدول.

- تمَ تحويل البيانات بالبراميل عند متوسط عوامل محددة بالنسبة إلى النفط الخام وللغاز الطبيعي المُسال على التوالي، بالنسبة إلى كل بلد.

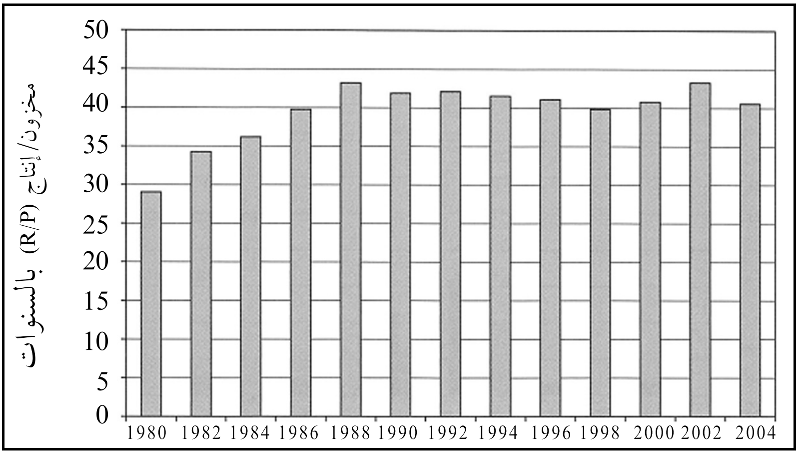
المصدر: جمعية الطاقة العالمية (IEA).



الشكل (5-6): احتياطي الغاز الطبيعي المثبت القابل للاستخراج 1999.

المصدر: مبني على بيانات من الـ : BP Statistical Review of World Energy (June 2005).

تبرز صورة مشابهة نوعاً ما بالنسبة إلى الغاز الطبيعي، كما يمكن مشاهدته في الشكل (5-6) (British Petroleum, 2005)، الذي يبيّن احتياطي الغاز الطبيعي المثبت القابل للاستخراج بتريليونات الأمتار المكعبة للسنوات 1984، 1994 و2004. كذلك، هناك ازدياد ملموس في إجمالي الاحتياطي العالمي خلال العشرين سنة هذه. ولكن السيطرة المتميزة للشرق الأوسط بالنسبة إلى احتياطي النفط الخام لُطِّفت في حالة الغاز الطبيعي بسبب المصادر الكبيرة جداً في روسيا، المشمولة ضمن احتياطي أوروبا وآسيا الأوروبية. كذلك، بما أن روسيا أقرب إلى الأسواق الكبيرة المتوقعة للغاز في أوروبا الغربية، وبما أن نقل الغاز بواسطة خط أنابيب أسهل بكثير من نقله بواسطة ناقلات للغاز الطبيعي المُسال، أو (LNG)، فإن روسيا من المتوقع أن تصبح المزوّد الأكبر للغاز الطبيعي بالمقارنة مع الشرق الأوسط، على الرغم من أن لكلتا المنطقتين احتياطيات متقاربة.

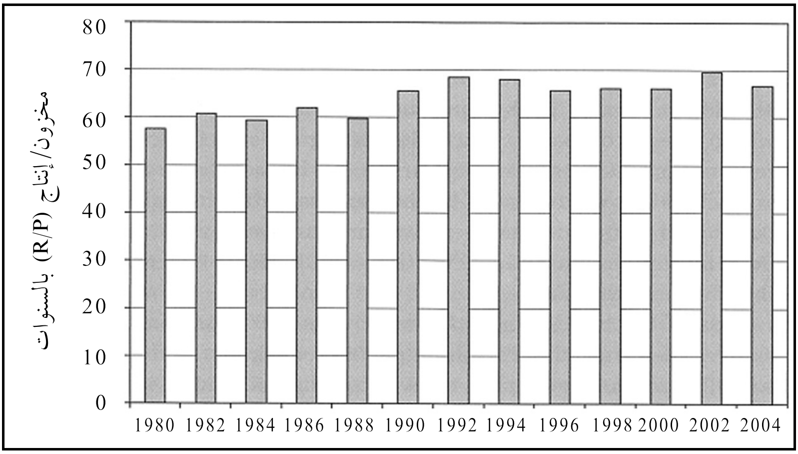


الشكل (5-7): نسبة الاحتياطي إلى الإنتاج بالنسبة إلى النفط 1980-2004

المصدر: مبني على بيانات من: BP Statistical Review of World Energy (June 2005).

إن قطاع أعمال النفط والغاز مسيطر عليه من قبل مجموعة صغيرة نسبياً من شركات الطاقة العالمية، وهذه الشركات حريصة جداً على أعمالها، تسعى إلى تأمين الطلب المتزايد. وتقوم بذلك عن طريق السعي الحثيث إلى استكشاف مصادر جديدة على التوازي مع إنتاج النفط والغاز من حقولها الموجودة. وتحاول كل شركة أن تزيد احتياطياتها من المصادر لكي تكون قادرة على أن تحافظ على نشاطها القابل للنمو، ولتؤمّن بشكل جيد الطلب العالمي على إنتاجها في المستقبل. والطريقة التي تراقب فيها هذه الشركات تقدمها هي حساب «نسبة الاحتياطي إلى الإنتاج» (R/P) في نهاية كل سنة بقسمة مخزونها من «الاحتياطي المثبت» على الإنتاج السنوي. يتم رصد ذلك من قبل جميع الشركات لأغراضها الخاصة، ومعظمها يحافظ أيضاً على رصد جميع ما يحصل عالمياً من إنتاج وتنقيب لتقدير مَقدرتهم التنافسية.

تبيّن الأشكال من (5-7) إلى (5-9) بيانات النسبة (R/P) عالمياً مجمعة بواسطة شركة النفط البريطانية (British Petroleum, 2005) بالنسبة إلى النفط والغاز والفحم الحجري. إن النسبة (R/P)



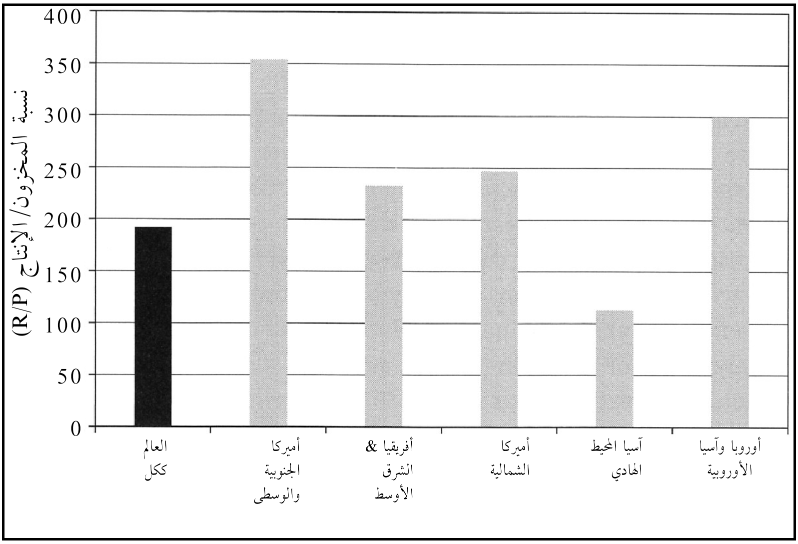
الشكل (5-8): نسبة الاحتياطي إلى الإنتاج بالنسبة إلى الغاز الطبيعي 1980-2004.

المصدر: مبني على بيانات من: BP Statistical Review of World Energy (June 2005).

العالمية للنفط وللغاز مبيّنة في الشكلين (5-7) و(5-8) لكل سنتين منذ العام 1980 حتى 2004. ويُلاحظ أنه في عام 1980 كانت النسبة الإجمالية العالمية للاحتياطي على الإنتاج بالنسبة إلى النفط بالضبط دون الثلاثين، ما يعني أنه إذا بقي معدل الإنتاج الحالي ثابتاً فإن الاحتياطي المثبت من النفط سوف ينضب في غضون ثلاثين عاماً. وقد ازدادت النسبة بثبات خلال ثمانينيات القرن الماضي لتصل إلى الذروة، أي حوالى 45 عند نهاية العقد. هذه الزيادة في نسبة (R/P)، مقابل الاستهلاك المتزايد بثبات، عائدة الى التنقيب الواسع وأعمال تطوير الحقول المنجزة عالمياً بواسطة شركات النفط. وقد وصلت نسبة الـ (R/P) في العقد الأخير بالنسبة إلى النفط إلى حوالى 40، وأشارت تقارير حديثة معدّة من قبل شركات نفطية عدة إلى أن على هذه الشركات زيادة نشاطاتها التنقيبية لكي تحافظ على النسبة بهذا المستوى. إن نسبة الـ (R/P) في الشرق الأوسط، باعتباره المصدّر الأكبر للنفط الخام، هي فوق 80، بينما النسبة في المناطق الرئيسة المستهلكة للنفط في شمال أميركا وأوروبا وآسيا الأوروبية، هي حالياً أقل من 20 بكثير.

يبيّن الشكل (5–8) بيانات مشابهة لنسبة الـ (R/P) بالنسبة إلى الغاز الطبيعي. يتشابه التوجه عالمياً ومحلياً مع التوجه بالنسبة إلى النفط، على الرغم من أن نسبة الـ (R/P) أعلى بكثير، وهناك نمو أقل على مدى العقدين الأخيرين مقارنةً بالنمو بالنسبة إلى النفط. هناك ازدياد كبير في استعمال الغاز خلال هذه الفترة، مع ازدياد استهلاك الغاز 75 في المئة خلال الفترة الممتدة من عام 1984 إلى 2004. إن معظم كمية الغاز الزائدة هذه استُخدمت لتوليد الكهرباء بواسطة محطات توليد دارة - مركّبة كفؤة، التي حلّت محل المحطات التي تعمل على الفحم الحجري في أجزاء عديدة من العالم. وقد كانت النسبة العالمية للـ (R/P) بالنسبة إلى الغاز الطبيعي تساوي 70 تقريباً في عام 2002، لكنها بالطبع اختلفت كثيراً أيضاً بحسب منطقة الإنتاج الرئيسة، كما حصل بالنسبة إلى النفط. إن هذه النسبة عالية جداً بالنسبة إلى الشرق الأوسط، حوالى 280، لكنها تعكس بجزء كبير الطلب الصغير نسبياً على الغاز في المنطقة وصعوبة نقل الغاز إلى مسافات طويلة بالمقارنة مع سهولة نقل النفط بواسطة البحار. هناك بعض الشك في أن نقل الغاز بواسطة خط أنابيب أو بواسطة البحار، على شكل مُسال (LNG)، سوف يتزايد في العقود الآتية لكي يتم استثمار الاحتياطي الكبير جداً للغاز الطبيعي الموجود في مناطق مثل الشرق الأوسط وأفريقيا.

أدى الطلب المتزايد على الغاز الطبيعي وأسعاره العالية الناتجة من ذلك في السنوات الأخيرة إلى اهتمام متجدّد في تطوير مصادر الغازات غير التقليدية، مثل «الغاز المُحكم» (Tight Gas) وميتان طبقة الفحم الحجري. تنتشر تكوّنات «الغاز المُحكم» بشكل واسع فعلاً وتتألف من غاز طبيعي محجوز في صخور مسامية ذات نفاذية منخفضة أو تكوّنات رملية. ما زالت هناك تقنيات جديدة قيد التطوير لكي تسمح باستخراج هذا الغاز، متضمنةً تقنيات كالتجزيء الهيدروليكي وحقن الماء المشابهة لتلك الطرق المستخدمة في



الشكل (5-9): نسبة احتياطي الفحم إلى الإنتاج 2003.

المصدر: مبني على بيانات من: BP Statistical Review of World Energy (June 2003).

عملية استخراج النفط المطوّرة. أما ميتان طبقة الفحم، كما يدل على ذلك الاسم، فهو غاز ميتان شُكّل وحُجز خلال تكوّن الفحم الحجري، وسوف ندرس ذلك بتفصيل أكثر في الفصل التالي. يمكن أن يؤدي كل من هذين المصدرين غير التقليديين إلى ازديادٍ مهم في احتياطي الغاز المثبت حالما تُنجز تقنيات الإنتاج الجديدة بشكل كامل.

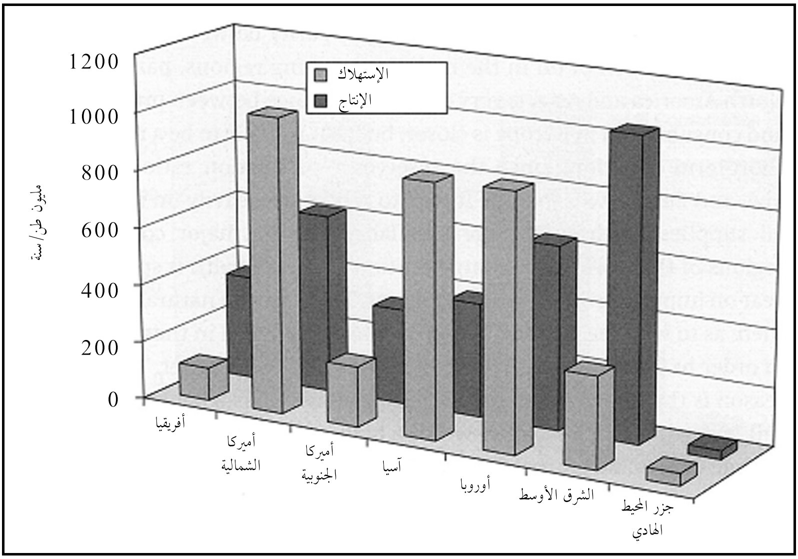
يبيّن الشكل (5-9) نسبة (R/P) للفحم الحجري عام 2003 للعالم بأسره، وأيضاً بحسب المناطق المنتجة الرئيسة. بما أن الفحم الحجري ما زال وقوداً ذا قيمة منخفضة نسبياً مقارنةً بالنفط والغاز الطبيعي، وبالتالي أقل جاذبية للشحن، يوجد هناك توازن أكبر بين إنتاج الفحم الحجري واستهلاكه في المناطق الرئيسة المنتجة له. إن لدى معظم مناطق العالم نسب (R/P) للفحم الحجري أعلى بكثير من 200، ما عدا آسيا حيث يتزايد فيها الطلب بسرعة على الفحم

الحجري لإنتاج الكهرباء، خصوصاً في الصين والهند. غير أن إجمالي النسبة العالمية (R/P) للفحم الحجري لا تزال حوالى 200، على الرغم من أن هناك تنقيباً قليلاً عن مصادر جديدة للفحم الحجري على الأقل مقارنةً بالتنقيب عن النفط والغاز. ومن المتوقع أن تزداد النسبة العالمية للفحم بشكل كبير فوق مستوى 200، نظراً إلى التوسع في التنقيب بشكل أكبر.

رأينا في هذا الفصل أن مخزون الطاقة العالمي في القرن الواحد والعشرين يستمر بسيطرة الوقود الأحفوري بقيمة حوالى 80 في المئة من إجمالي مخزون الطاقة العالمي. ويعتبر النفط الوقود الأحفوري الأكثر انتشاراً حيث يُزوّد أكثر بقليل من ثلث إجمالي احتياجاتنا للطاقة، ويعود ذلك بشكل رئيس إلى انتشار استخدامه كوقود للنقل لتزويد السيارات، والسهولة التي يمكن بها تخزين منتجات النفط المكرّر ونقلها. كذلك فإن النفط ليس مصدراً متجدداً، وله أخفض نسبة احتياطي إلى الإنتاج، حوالى 40، مقارنةً بجميع مصادر الوقود الأحفوري. وعلى الرغم من أن النسبة 40 من (R/P) يمكن أن تبدو عالية فعلاً، هناك شيء من الشك بأن الازدياد المستمر في الطلب على الطاقة، مع الصعوبة المتزايدة في إيجاد وتطوير مصادر جديدة للنفط الخام، سوف يؤكّد الحاجة إلى تطوير مصادر بديلة للطاقة باتجاه منتصف هذا القرن وإلى القرن التالي.

5. 3. توازن الطلب - المخزون العالمي

إن الطلب على الطاقة ومخزونها متوازنان بتأسيس تسعير سلعي مناسب في الأسواق العالمية كما في أي نظام اقتصادي. يمكن تحقيق ذلك بعض الأحيان على أساس إقليمي أو وطني إذا كانت مخزونات الطاقة متوافرة محلياً بثبات، أو عبر التجارة العالمية إذا لم تتوافر محلياً. كما رأينا أن مصدر التزوّد بالطاقة معظمه من الوقود الأحفوري، وهو ليس موزعاً بتساوٍ حول العالم. ويعتبر ذلك صحيحاً



الشكل (5–10): استهلاك وإنتاج النفط 1999

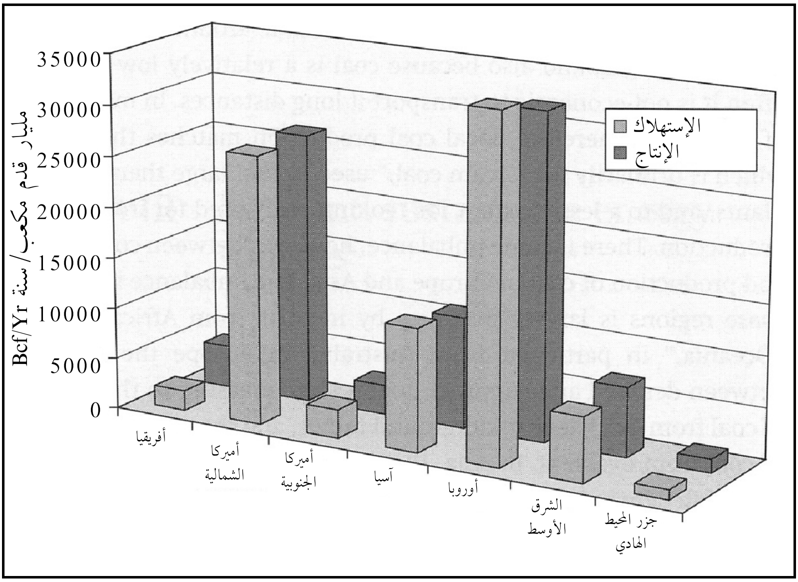
المصدر: مبني على بيانات من جمعية الطاقة العالمية: Survey of Energy Resources Report 2001.

بالأخص بالنسبة إلى النفط الخام الذي يزوّد تقريباً أكثر من ثلث إجمالي الطلب العالمي على الطاقة، وبالتالي هناك تداول عالمي كبير ونظام نقل لترحيل كميات النفط من مناطق الإنتاج الرئيسة، كالشرق الأوسط، إلى مناطق الاستهلاك الرئيسة، كأميركا الشمالية وأوروبا وآسيا. يبيّن الشكل (5–10) (World Energy Council, 2005) كلاً من استهلاك النفط، بملايين الأطنان في السنة، وإنتاج النفط في المناطق الرئيسة من العالم عام 1999. على الرغم من أن وجود كمية إنتاج كبيرة من النفط في مناطق الاستهلاك الرئيسة في أميركا الشمالية وأوروبا وآسيا، فإن هذه الكمية ليست كافية لكي تناسب إجمالي الطلب. إن المنطقة المنتجة الرئيسة للنفط في العالم هي الشرق الأوسط، التي تتصف بعدد سكان قليل نسبياً، وبالتالي بطلب منخفض على النفط، لذلك ينقل النفط من هذه المنطقة إلى مناطق الاستهلاك الرئيسة. كذلك تُنتج أفريقيا وجنوب أميركا كمية نفط أقل

بكثير من الشرق الأوسط، والطلب لديها منخفض نسبياً، وبالتالي هي أيضاً مزوِّدة مهمة للنفط إلى مناطق الاستهلاك الأكبر.

عند تفحص الشكل (5-10) يظهر بشكل واضح جداً التباين بين إنتاج النفط واستهلاكه في مناطق الاستهلاك الرئيسة خصوصاً في شمال أميركا وآسيا. أما التوازن بين الإنتاج والاستهلاك في أوروبا فهو أقرب، لكن من المتوقع أن يكون ذلك حالة قصيرة الأمد نسبياً لأن نسبة الاحتياطي إلى الإنتاج هي فعلاً منخفضة، وأن أوروبا سوف تضطر قريباً للاعتماد بشكل أكبر على كميات النفط المستوردة. ومع عدم التوازن الكبير في مناطق الاستهلاك الرئيسة للعالم، فإن جزءاً كبيراً جداً من ثروة هذه المناطق يصرف كل سنة على استيراد النفط من مناطق أخرى. والسؤال الذي يُطرح بشكل طبيعي، هو لماذا لا يمكن للطلب على النفط أن ينخفض في هذه المناطق لكي يصبح الطلب والمخزون متقاربين أكثر إلى بعض، حيث يبدو أن الطلب على البنزين والوقود النفطي وهو ما يدعوه الاقتصاديون «سعر غير مرن» (Price Inelastic)، هو السبب الرئيس، أي إن سعراً أعلى يؤدي إلى تغير قليل جداً في الطلب على الوقود. ذلك يعني أنه، مثلاً، مع ضرائب أعلى على وقود السيارات سوف لن يؤثر ذلك كثيراً في المسافات التي يقطعها الناس بالسيارات، أو في حجم السيارات التي يشترونها، وبالتالي على استهلاك الوقود. هذه الناحية يمكن ملاحظتها بوضوح في أوروبا حيث إن سعر البنزين ووقود الديزل هو أكثر من ضعف سعره في الولايات المتحدة. على الرغم من أن السيارات الأوروبية تميل إلى أن تكون أصغر، وبالتالي أكثر كفاءة بالنسبة إلى الوقود، فإن هناك اختلافاً قليلاً في عدد السيارات الفعّالة لكل شخص، أو في عدد الأميال المقطوعة كل سنة في أوروبا بالمقارنة مع الولايات المتحدة.

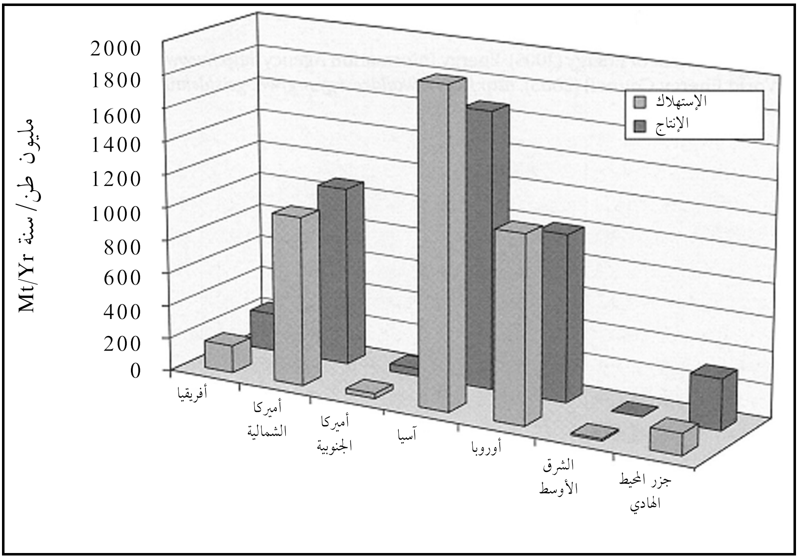
يبيّن الشكل (5-11) استهلاك الغاز الطبيعي وإنتاجه حول



الشكل (5-11): استهلاك الغاز الطبيعي وإنتاجه - 1999

المصدر: مبني على بيانات من جمعية الطاقة العالمية: Survey of Energy Resources Report 2001.

العالم بمليارات الاقدام المكعّبة، أو (Bcf) بالسنة (World Energy Council, 2005). ويمكن الملاحظة أنه في هذه الحالة هناك تطابق أقرب بكثير بين الاستهلاك والإنتاج مقارنةً بحالة النفط. يعود ذلك، إلى حد ما، إلى أن مخزونات الغاز الطبيعي متوزعة بتساوٍ أكثر حول العالم، لكن أيضاً إلى حد بعيد بسبب صعوبة نقل الغاز لمسافات أكبر، خصوصاً بواسطة البحار. وبالتالي هناك تداول محدود بالغاز الطبيعي فقط بين المناطق، على الرغم من أن آسيا تستورد كميات كبيرة عن طريق البحر على شكل غاز مُسال (LNG)، وتستورد أوروبا بشكل متزايد الغاز من أفريقيا ومن دول الاتحاد السوفياتي السابق. وكلما ازداد الضغط على مخزونات الغاز في مناطق الاستهلاك الرئيسة، خصوصاً في الدول النامية بسرعة في آسيا مثل الصين والهند، نتوقع أن نشاهد تزايداً في نقل الغاز عبر البحار على



الشكل (5-12): استهلاك الفحم وإنتاجه - 1999

المصدر: مبني على بيانات من جمعية الطاقة العالمية: Survey of Energy Resources Report 2001.

شكل غاز مُسال (LNG). ومن المحتمل أن يكون ذلك صحيحاً أيضاً في اليابان التي تعتمد بشكل كلي تقريباً على المصادر المستوردة من الوقود الأحفوري، وحيث يمكن للنفط أن يستبدل بالغاز بشكل أوسع في تطبيقات يكون فيها ذلك ذا جدوى.

إن استهلاك الفحم الحجري وإنتاجه هو أيضاً متوازن بشكل متقارب جداً، كما هو مبيّن في الشكل (5-12) (World Energy Council - 2005). يعود ذلك إلى أن الفحم الحجري متوافر بشكل واسع حول العالم أكثر بكثير من النفط والغاز، وأيضاً لأن الفحم الحجري هو وقود رخيص نسبياً، وغالباً ما يكون نقله إلى مسافات طويلة غير اقتصادي. وهكذا، في معظم مناطق العالم يتوازن الإنتاج المحلي من الفحم الحجري مع الطلب عليه، وبشكل رئيس بالنسبة إلى الفحم البخاري المستخدم لتغذية منشآت الطاقة الكهربائية

الحرارية الضخمة، وإلى حد أقل بالنسبة إلى «فحم الكوك» المستخدم في إنتاج الحديد والفولاذ. وهناك بعض من عدم التوازن بين استهلاك الفحم وإنتاجه في أوروبا وآسيا. وتتم تسوية عدم التوازن بالمخزون في هذه المناطق إلى حد بعيد، بالاعتماد على الاستيراد من أفريقيا ومن جزر المحيط الهادي (أوقيانيا)، وبالأخص من أستراليا. في أوروبا، يعود عدم التوازن بين الطلب والمخزون بشكل كبير إلى الكلفة العالية لاستخراج الفحم الحجري من مناجم محلية عميقة تحت الأرض، والكلفة المنخفضة نسبياً للفحم الحجري من بلدان خارجية. أما في آسيا، فيعود عدم التوازن بشكل رئيس إلى الطلب العالي والكبير على الفحم في الصين، حيث يوجد هناك طلب مُتنام بسرعة كبيرة بالنسبة إلى الفحم البخاري لإنتاج الكهرباء، وبسببٍ المسافة القصيرة نسبياً من أستراليا.

المراجع

Books

International Energy Agency (IEA). *Key World Energy Statistics*. Paris, France: IEA, 2004.

____________. Key World Energy Statistics. Paris, France: IEA, 2005.

Periodicals

"Energy in Focus." *BP Statistical Review of Wold Energy* (British Petroleum): June 2005.

Websites

US Department of Energy (2005). Energy Information Agency. <http://www.eia.doe.gov/>

World Energy Council (2005). <http://www.worldenergy.org/wec-geis/default.asp>.

القسم الثالث

مصادر الطاقة المُستدامة والجديدة

6 ـ الوقود الأحفوري غير التقليدي

6. 1. مصادر جديدة للنفط والغاز

إن ما شاهدناه في الفصل السابق، هو أنه سيحصل ضغط كبير على احتياطات الوقود الأحفوري التقليدي على مدى العقود القليلة الآتية. سوف يلاقي الطلب، بشكل خاص، على النفط خصوصاً نمواً سنوياً كبيراً، وسوف يكون من الصعب أن نحافظ على النسبة التاريخية للاحتياطي إلى الإنتاج (R/P) حول القيمة 40. هكذا توجد حاجة إلى تطوير مصادر جديدة، أو غير تقليدية للوقود الأحفوري لتكمل مخزون النفط الخام التقليدي. من المحتمل أن نحتاج إلى ذلك في نهاية القرن الحادي والعشرين على الأقل، عندما تتوافر هناك مخزونات كبيرة من الطاقة الأوّلية المتجددة، أو المُستدامة بكميات كافية لتلبي معظم الطلب العالمي على الطاقة. في الأجل القريب، تتضمن هذه المصادر الجديدة للوقود الأحفوري استخراج النفط الصناعي من رمال النفط المنتشرة وترسبات الصخور النفطية الموجودة في أجزاء عديدة من العالم، واستخراج الغاز الطبيعي من طبقات الفحم غير المستعملة المعروفة «بميثان طبقة الفحم». إن استخدام الوقود الأحفوري بطريقة ألطف بيئياً على المدى البعيد، من الممكن أن يطول بالوصول إلى مخزون الفحم الحجري العالمي الكبير باستخدام التقنيات المسماة تقنيات «الفحم النظيف»، أو حتى بالوصول إلى مصادر هيدرات الميثان الكبيرة الممكن تواجدها في المحيطات العميقة. إذا تم إثبات أن تلطيف الكربون بحجز غاز CO_2 وتخزينه، المسمى أيضاً «عزل الكربون»، هو ذو جدوى من الناحية الفنية والاقتصادية، عندها من الممكن أن نستمر باستخدام

الوقود الأحفوري بشكل جيد إلى القرن الثاني والعشرين. في هذا الفصل سوف نعرض باختصار الوضع الحالي لتطور هذه المصادر الجديدة أو غير التقليدية للوقود الأحفوري.

تمتلك كندا مصادر ضخمة من كل من الرمال النفطية والنفط الثقيل، المُركزة بشكل رئيس في منطقة أثاباسكا في شمال ألبرتا. وقدّر المصدر النهائي للقار (Bitumen) المحتجز في رمال هذه المنقطة وحدها، بواسطة مجلس مؤسسة ألبرتا للطاقة والمرافق (AEUB)، على أنه مكافئ لحوالى 2.5 تريليون برميل من النفط التقليدي. كما هي الحال مع معظم الترسبات النفطية، فإن استخراج جميع هذه المصادر لن يكون ذا جدوى اقتصادية وفنية. لقد قدّرت مؤسسة (AEUB) أن حوالى 315 مليار برميل من النفط الخام الصناعي، مساوٍ للاحتياطي المثبت للسعودية، يمكن أن يكون قابلاً للاستخراج أخيراً. من هذه المصادر يوجد حوالى 175 مليار برميل مصنفة بالاحتياطي المثبت القابل للاستخراج بواسطة طرق الإنتاج الحالية. يمثّل ذلك زيادة كبيرة في إجمالي الاحتياطي المثبت للنفط الذي سيكون متوافراً عالمياً، والذي قُدِّر حالياً بواسطة جمعية الطاقة العالمية بحوالى تريليون برميل. يحصل حجز النفط الثقيل أو القار في خليط من الرمل والماء والطين، الذي قدّم حتى الماضي القريب، تحدّياً كبيراً في عملية استخلاصه. وقد أدت أعمال البحث والتطوير، خلال الأربعين سنة الأخيرة، إلى طريقتين مختلفتين لاستخلاص هذا المصدر الهائل من النفط الخام الصناعي. تُنتج حالياً منشآت ضخمة عدة نفطاً خاماً صناعياً ذا جودة عالية من منطقة الأثاباسكا، وهناك الآن توسعات كبيرة للمنشآت إما في طريق التحضير أو في مرحلة تخطيط مُتقدمة.

إن الطريقة المُبكرة المستخدمة لاستخلاص النفط الخام الصناعي من طبقات الرمال النفطية الكندية الضخمة تبدأ مع استخراج للطبقات السطحية (Open-Cast) الكبيرة جداً الموجودة في منقطة الأثاباسكا في شمال ألبرتا. بعدئذٍ تنقل الرمال المحتوية القار إلى منشأة الاستخلاص

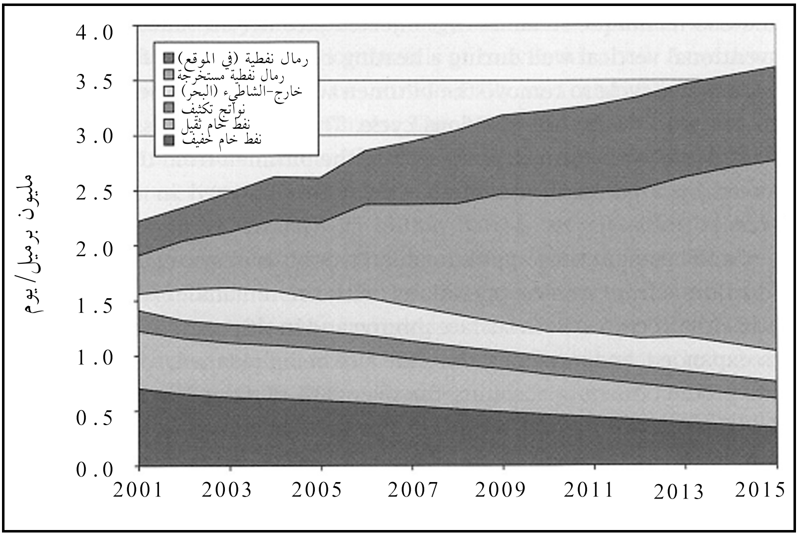
القريبة، حيث يُفصل القار عن الرمل باستخدام ماء حار، ولاحقاً يحوّل إلى نفط خام صناعي في منشأة التحسين قبل إرساله إلى مصفاة النفط. خلال هذه العملية يمكن سحب حوالى 75 في المئة من القار من الرمل النفطي، إذ يتم إنتاج برميل من النفط الصناعي من كل طنين من الرمال النفطية التي تستخرج وتعالج. أول منشأة لذلك كانت «مشروع الرمال النفطية الكندية الكبير» الذي يُشغَّل الآن بواسطة (Suncor Energy) الذي تم افتتاحه في عام 1967 وأُتبع بعملية الاستخلاص الكبيرة الثانية التي افتُتحت بواسطة اتحاد (Syncrude Consortium) في عام 1978. بالنسبة إلى القار الموجود في طبقات أعمق تحت الأرض، يصبح الاستخراج من دون جدوى، وقد تم تطوير طرق استخراج عدة محدّدة طبيعياً، من ضمنها تقنية الأنبوبين البسيطة، المعروفة بطريقة «تصريف الجاذبية المُساعَد بالبخار» (SAGD) التي يتم فيها ثقب بئرين أفقيين متوازيين، واحداً فوق الآخر، ضمن طبقة الرمال النفطية المترسبة، يتم حقن البُخار من الأنبوب العُلوي في طبقة الرمال النفطية، الذي يُسخّن القار مُخفّضاً لزوجته لكي يتم تصريفه بواسطة الجاذبية إلى الأنبوب السفلي المُثقب، بعدئذٍ يُضخ القار إلى منشأة التحسين لكي يتم تحويله إلى نفط خام صناعي. توجد طرق أخرى محدّدة طبيعياً منها تحفيز دورة البخار (Cycle Steam Stimulation) (CSS)، واسترجاع البخار (Vapor Recovery Extraction - VAPEX). خلال طريقة (CSS)، يُحقن البخار أولاً في الرمال النفطية من بئر عمودية تقليدية خلال دورة التسخين، وتُتبع هذه بدورة الضخ لنزع القار الذي قد انفصل عن الرمل خلال الدورة السابقة. أما عملية (VAPEX)، فإنها تستخدم مادة مُذيبة بدلاً من البخار لفصل القار عن الرمل أولاً، تتبعها عملية ضخ مماثلة لتلك المستخدمة في عملية (CSS).

إن ثلثي إنتاج الخام الصناعي تقريباً ناتج من عمليات الاستخراج في الوقت الحاضر، أما البقية فناتجة من عمليات متنوعة موجودة طبيعياً. تم توسيع كل من الاستخراج السطحي والعمليات التي

تحصل طبيعياً، وهناك أيضاً عمليات جديدة يتم التخطيط لها، بحيث إن إنتاج الرمال النفطية يشكّل الآن فوق 30 في المئة من إنتاج إجمالي النفط الكندي. يقدّر الإنتاج الحالي للرمال النفطية بمليون برميل في اليوم تقريباً، ومع منشآت إضافية قيد البناء الآن أو مخطط لها، من المتوقع أن ينمو الإنتاج إلى أكثر من 60 في المئة من إنتاج نفط في غرب كندا عند عام 2010. بالطبع توجد مسائل بيئية مترافقة مع إنتاج النفط الخام الصناعي على شكل واسع، منها التخلّص من النفايات أو تدفق الرمل المتبقي واستخدام كميات كبيرة من الماء والغاز الطبيعي في العملية. يستخدم حالياً الغاز الطبيعي لتوليد البخار والحرارة المطلوبتين لفصل القار عن الرمل والمواد الطينية، ويستخدم الماء في عملية الفصل. إن الطاقة (على شكل غاز طبيعي) المطلوبة لإنتاج برميل من القار النفطي في الوقت الحالي، هي بحدود 10-20 في المئة من محتوى الطاقة في النفط الخام الصناعي الناتج، ويعتمد ذلك على عملية الاستخراج المستخدمة. وهناك طرق جديدة قيد التطوير والتحسين باستمرار لتخفيض استهلاك الطاقة، وهناك أيضاً طرق قيد التنفيذ لزيادة تدوير المياه المستخدمة في عملية الاستخراج. مثلاً، إن تخفيض درجة حرارة الماء الحار المستخدم في الاستخراج من 80 إلى 35 درجة مئوية في منشأة واحدة قد أدى إلى تخفيض كبير في كمية الغاز الطبيعي المطلوب وانبعاثات CO_2 الناتجة. بعد استخلاص القار، يُعاد الرمل والمواد الصلبة المتبقية إلى موقع المنجم لكي يكتمل استصلاح الأرض. يوجد حالياً أربع منشآت رئيسة عاملة في منطقة الرمال النفطية في أثاباسكا في شمال ألبرتا. إن المنشأتين الأولى والثانية اللتين يتم بناؤهما وتشغيلهما تجارياً، هما منشأة (Suncor Energy) التي تُنتج حوالى 200,000 برميل يومياً من الخام الصناعي، ومنشأة (Syncrude Canada Operation) التي تُنتج أيضاً حوالى 200,000 برميل يومياً، كذلك مع توسع جارٍ لزيادة الإنتاج إلى 350,000 برميل يومياً. وتعتبر مشاريع الرمال النفطية الأثاباسكية

المُدارة بواسطة شركة (Shell Canada) أن لديها قدرة إنتاجية تصل إلى 65,000 برميل، يومياً، مع خطة لزيادة هذه الكمية إلى 150,000 برميل، وأخيراً شركة (Imperial Oil) التي تُشغّل تجهيزات (Cold Lake) بقدرة إنتاجية أعلى بقليل من 100,000 برميل يومياً من الخام الصناعي. وهناك منشآت أخرى مُتعددة أيضاً لا تزال إما قيد الإنشاء، أو في مرحلة التخطيط المُبكِرة من التطوير.

يبيّن الشكل (6-1) إجمالي إنتاج النفط الكندي للسنوات 2001 - 2005 مع تقديرات مبيّنة أيضاً للإنتاج حتى عام 2015. يُمكن المُلاحظة أنه خلال هذه الفترة تم تقدير الإنتاج بزيادة من 2.6 مليون برميل يومياً حالياً إلى 3.6 مليون برميل يومياً عام 2015. على أي حال، تم تقدير إنتاج النفط الخام التقليدي في كندا الغربية بهبوط من حوالى 1.25 مليون برميل يومياً في عام 2001 إلى حوالى نصف هذا المُستوى في عام 2015. يُشكل الإنتاج خارج الشاطىء (Offshore) الذي تدفق إلى كندا حوالى 250,000 برميل يومياً في (المحيط الأطلسي) عام 2005، لكن لا يتوقع له أن ينمو أكثر من ذلك. وقُدّرت كلفة إنتاج النفط الخام الصناعي من الرمال النفطية بواسطة هيئة الطاقة الوطنية الكندية (2005) لتتراوح من 10 دولارات للبرميل بالنسبة إلى بعض العمليات الموجودة طبيعياً إلى 25 دولاراً تقريباً للبرميل بالنسبة إلى عمليات الاستخراج. ومع وصول أسعار النفط العالمية إلى مُستويات عالمية تاريخية، أي 70 دولاراً تقريباً للبرميل في عام 2005، فإنه من المُتوقع أن ينمو الإنتاج من الرمال النفطية الكندية بشكل سريع. إن النمو في إجمالي الإنتاج بمليون برميل يومياً، خلال الفترة الزمنية المقدرة، يعود كلياً إلى إنتاج النفط الخام الصناعي من الرمال النفطية، ومعظم هذا الإنتاج هو من عمليات الاستخراج السطحية. يشكل ذلك ازدياداً بحوالى 40 في المئة على مدى الإنتاج السنوي في عام 2003، وسوف يَخدم المخزون المُتنامي سوق كندا المحلية، بالإضافة إلى بعض التصدير إلى الولايات المتحدة التي تعتمد بشكل مُتزايد على النفط المُستورد.



الشكل (6-1): إسقاط لإنتاج النفط الكندي حتى عام 2015.

المصدر: مبني على بيانات من توقع المخزون والإنتاج للنفط الخام الكندي 2006 - 2020.

تتواجد الصخور النفطية، الشبيهة نوعاً ما بالرمال النفطية، لكن مع وجود مواد عضوية مُحتجزة في التشكيلات الصخرية الترسبية، في جميع بقاع العالم بكميات كبيرة جداً. يمكن فصل المواد العضوية عن الصخر وتحويلها إلى نفط باستخدام الحرارة وإضافة الهيدروجين، لكنها عملية أصعب بكثير من تلك المُستخدمة من أجل الاستخراج من الرمال النفطية ومُكلفة أكثر. لقد قدّرت جميعة الطاقة العالمية (2005) أن لدى الولايات المتحدة أكثر من 60 في المئة من إجمالي مصادر النفط الصخري العالمي، موجود بشكل رئيس في ولايات كولورادو، يوتا ووايومينغ. وإن مُجمل احتياطي النفط القابل للاستخراج، الذي بدا أنه يمكن الحصول عليه من الصخر النفطي في الولايات المتحدة، يبلغ 500 مليار برميل تقريباً، أو حوالى نصف إجمالي الاحتياطي العالمي المُثبت من النفط الخام التقليدي. على

الرغم من أن شركات نفطية عدة قد حصلت في الماضي على عقود استئجار صخور نفطية، وأنه تم بناء منشآت تجريبية صغيرة لاختبار عملية استخراج النفط، لكن كلفة الإنتاج العالية والاعتبارات البيئية أدّت إلى التخلّي عن كل هذه المحاولات. يمكن لاستخراج النفط الخام الصناعي بكميات كبيرة من الصخر النفطي في الولايات المتحدة أن يُستأنف يوماً ما، لكن من المتوقع أن ذلك لن يظهر حتى يدفع النقص في النفط التقليدي ازدياداً كبيراً في الأسعار أعلى من تلك المُتداولة اليوم. وقد وُجدت أيضاً الصخور النفطية في مناطق أخرى من العالم، واستخدمت في بعض الأحيان مباشرةً مكان الفحم الحجري في المحطات الحرارية لتوليد الكهرباء. مثلاً، وصل الإنتاج في أستونيا، لهذا الغرض، إلى حوالى 30 مليون طن سنوياً في عام 1980، لكن ذلك انخفض بعدئذ إلى حوالى ثلث هذا المستوى. وإذا استمرت أسعار الفحم بالازدياد في الأسواق العالمية، يمكن بعدئذ أن يزداد استخدام الصخر النفطي لإنتاج الطاقة الكهربائية، خصوصاً في تلك البلاد ذات المصادر المحدودة من الفحم الحجري.

هناك مصدر بديل آخر للوقود الأحفوري وهو «ميثان طبقة الفحم» (Coal-bed Methane)، وهو بشكل أساسي غاز طبيعي تم حجزه في عروق وتجعدات الفحم الحجري خلال تشكل الفحم. وبما أن مصادر الفحم الحجري كبيرة جداً ومُوزعة بشكل كبير حول العالم، يمثل ميثان طبقة الفحم مصدراً مهماً في مناطق عديدة. توفّر ترسبات الفحم الحجري مساحة سطحية داخلية كبيرة جداً، وبسبب ذلك فهي قادرة على تخزين كميات كبيرة من الغاز الطبيعي. بناءً على دراسة جيولوجية (US Geological Survey USGS, 2005)، فإن ترسبات الفحم الحجري قادرة على تخزين 6 - 7 مرات كمية الميثان التي يمكن أن نجدها طبيعياً في الأحواض الصخرية المسامية التقليدية من الحجم نفسه. وتم تقدير هذا النوع من المصادر في الولايات المتحدة، بواسطة (USGS)، بحوالى 700 تريليون قدم مكعب. من

هذه الكمية، هناك 100 تريليون قدم مكعب يفترض أن تكون قابلة للاستخراج، وهي كمية تساوي 60 في المئة تقريباً من إجمالي الاحتياطيات الأميركية المثبتة (167 تريليون قدم مكعب). هناك مصادر في أجزاء أخرى من العالم ليست مُحدَّدة بشكل جيد لكن من المتوقع أن تكون موزعة على نطاق واسع، نتيجة التوزع الواسع جداً لمصادر الفحم. إن ميثان طبقة الفحم غالباً ما يوجد في ترسبات الفحم الضحلة، وهكذا يتم فعلاً إنتاجه بسهولة بحفر آبار تصل إلى هذه الترسبات. كما يوجد غاز الميثان عادةً بشكل مُختلف عمّا هو الحال في حقول الغاز التقليدية، مع الماء الذي يجب أن يُضخ أولاً خارج الطبقة الترسبية والتخلص منه بطريقة مقبولة بيئياً. إذا أمكن وجود طرق للتخلص من الكميات الكبيرة من هذا الماء بأمان، بعدئذ يمكن توقُّع أن يُقدم ميثان طبقة الفحم إضافة كبيرة إلى مصادر الغاز الطبيعي التقليدية حول العالم. إن الاستفادة المضافة تعني أنه من المحتمل أن تكون المصادر موزعة بشكل أكبر مقارنةً بمصادر الغاز الطبيعي التقليدية، بحيث يمكن إنتاج الغاز محلياً بدلاً من الاعتماد على خطوط الأنابيب الكثيرة، أو على ناقلات الغاز المُسال (LNG) للنقل من مناطق أخرى. ومن المتوقع أن تكون هذه الاحتياطيات الإضافية من الغاز مكتشفة بشكل أوسع ومستخدمة بشكل أكبر، لأن كميات الغاز الطبيعي التقليدي سوف تنضب، ويصبح الغاز أكثر كلفةً في السوق العالمية.

إن اكتشاف كميات كبيرة جداً من هيدرات الميثان (الميثان هو المركّب الرئيس للغاز الطبيعي) ذات البنية المعقّدة (Clathrate)[*] الشبيهة بالبلَّورية مؤلفة من جزيئات ميثان محاطة بجليد على قيعان المحيطات العميقة وفي الطبقة المتجلدة الشمالية، قد قاد بعض

(*) :Clathrate مُركّب صلب ببنية فيزيائية تكون فيها جزيئات مادة ما محاطة بشكل تام ضمن البنية البلَّورية لمادة أخرى.

المراقبين إلى الاعتقاد بأن هذه سوف تكون المستقبل الطويل الأمد لمخزون الغاز الطبيعي. في الواقع يشكل ذلك مصدراً كامناً هائلاً للطاقة الذي قدَّرته (USGS) بأن هيدرات الميثان تحوي ضعف كمية الكربون المحتواة في كل أنواع الوقود الأحفوري الأخرى على الأرض! وقد ذكرت (USGS) أن الترسبات في قاع المحيطات يمكن أن تصل حتى 13 كيلومتراً بالعمق في بعض المناطق، ويمكن أيضاً أن تكون حاجزةً بعضاً من غاز الميثان الذي لا يترابط ببنى الهيدرات البلَّورية. إن هذا المصدر المعقّد غير مفهوم بشكل جيد، ويجب تطوير تقنيات الاستخراج الاقتصادية أو العملية لهذا المصدر الهائل للميثان في المستقبل. يعتقد الباحثون أن طرق حفر مشابهة لتلك المستخدمة لاستغلال مصادر الغاز الطبيعي التقليدية، يمكن أن تكون أيضاً مطبقة على هيدرات الميثان، لكن هناك حاجة إلى إنجاز عمل أكبر بكثير قبل التمكن من إيضاح طرائق إنتاج قابلة للتطبيق اقتصادياً.

6. 2. عمليات مُعالجة الفحم النظيفة

يستخدم الفحم الحجري بشكل كبير حول العالم، وبشكل رئيس من أجل توليد الكهرباء وإرجاع فلزات الحديد الخام في مصانع الفولاذ. بما أن مصادر الفحم الحجري كبيرة جداً والفحم الحجري متوافر بكثرة في العديد من المناطق، هناك اهتمام كبير في توسيع استعمال الفحم الحجري. غير أن الاحتراق التقليدي للفحم الحجري يحمل معه ضرائب بيئية مهمة، من ضمنها انبعاثات غازات NO_x وSO_x وجسيمات دقيقة، التي يمكن بمجموعها أن تسبب تأثيرات صحية كبيرة. أيضاً، بسبب النسبة العالية للكربون - إلى- الهيدروجين، يُنتج الفحم الحجري كميات أكبر بكثير من غاز CO_2 بوحدة طاقة الخرج بالمقارنة مما تنتجه أنواع الوقود الأحفوري الأخرى. وقد أدى ذلك إلى أبحاث مهمة في ما يسمى تكنولوجيا «الفحم النظيف» (Clean Coal) التي تسعى إلى تخفيض التأثيرات البيئية لاستخدام الفحم. بما أن مصادر الفحم هي أكثر بكثير من كلٍ

من مصادر النفط والغاز وموزعة على نطاق واسع حول العالم، هناك أيضاً مسعى كبير من البحث موجّه إلى تحويل الفحم الحجري إلى مصادر يمكن نقلها بشكل أكبر ومن السهل استخدامها على شكل وقود سائل وغازي مُشتق من الفحم الحجري. في المُستقبل، عندما تصبح مخزونات الغاز والنفط التقليدية قليلة وبالتالي مكلفة، يمكن أن يكون هناك حاجة إلى الاعتماد على الفحم الحجري كمصدر للمواد الأولية الكربوهيدراتية من أجل إنتاج المواد الكيميائية والبلاستيكية.

إن معظم محطات الطاقة الكهربائية التي تعمل على الفحم الحجري تستخدم اليوم تكنولوجيا «الوقود المسحوق» أو (Pulverized Fuel - PF)، حيث يتم فيها طحن الفحم إلى مسحوق ناعم جداً، وبعدئذ يُنفخ إلى حجرة الاحتراق في المرجل حيث يُحرق بشكل معلق. يَرفع مرجل تقليدي ضغط البخار إلى حوالى 165 بار، وإلى درجة حرارة تصل إلى حوالى 565 درجة مئوية. ضمن هذه الظروف تكون الكفاءة الحرارية الكلية لمنشأة توليد الطاقة الكهربائية، مأخوذة كنسبة القدرة الكهربائية المتولّدة إلى معدّل استهلاك الفحم، أقل من 40 في المئة بقليل. وتبيّن القوانين الأساسية للثرموديناميك أنه يمكن الحصول على كفاءة حرارية متزايدة بزيادة متوسط درجة حرارة البخار، ولذلك يبحث المهندسون دائماً عن طرق لتنفيذ ذلك. هناك طريقة يتم الآن انتشارها تجارياً تعتمد على رفع ضغط البخار إلى ما يدعى الضغوطات «فوق الحرجة»، حيث لا يتغير فيها طور البخار في المرجل من بخار إلى سائل مطلقاً، لكن يبقى مائعاً بطور وحيد وكثيف جداً. ثم يتم نقل الحرارة في المرجل إلى هذا المائع ذي الكثافة العالية عند متوسط درجة حرارة أعلى بكثير من درجة الحرارة التي يمكن تحقيقها في مرجل تقليدي، حيث يتم أولاً تحويل كل الماء إلى بخار عند درجة حرارة منخفضة ومن ثم تسخينه (Super Heat) إلى درجة حرارة أعلى. تعمل هذه المنشآت «فوق الحرجة» عند ضغط حوالى 240 بار، ونتيجة ذلك تزداد الكفاءة

الحرارية إلى حوالى 44 في المئة. على الرغم من هذه العملية يمكن أن تبدو إنجازاً متواضعاً إلى حدٍ ما مقارنةً بـ 40 في المئة كفاءة تقريباً حُققت بواسطة محطات الطاقة التقليدية، إلا أنها تمثّل تخفيضاً قيّماً 10 في المئة في كمية الوقود المطلوبة لتوليد كمية معينة من الكهرباء، وفي حجم انبعاثات غاز CO_2 الناتج. هناك أكثر من 400 منشأة كهربائية فوق حرجة تم إنشاؤها الآن عالمياً، وستصبح هذه التكنولوجيا بسرعة معياراً جديداً لمحطات الطاقة التي تعمل على الفحم الحجري المطحون. هناك طرق أخرى لاستخدام الفحم الحجري مباشرةً في توليد الطاقة الكهربائية بكفاءة حرارية عالية وانبعاثات أقل، هي أيضاً قيد التطوير، لكنها لم تحقق تسويقاً واسع الانتشار بعد. من هذه الطرق عملية الطبقة المائعة المضغوطة حيث يُحرق الفحم في وعاء مضغوط محكم، ما يتيح إمكانية استخدام غازات الاحتراق الحارة لإدارة توربين غازي، بينما يتم توليد البخار في الوقت نفسه باستخدام أنابيب نقل الحرارة المَغطّسة في الطبقة المُميَّعة. إن الفائدة من هكذا نظام هي زيادة الكفاءة التي أصبحت ممكنة بتشغيل كل من التوربين الغازي والتوربين البخاري بطريقة الدارة المركبة (الموصوفة أدناه)، التي يمكن أن تؤدي إلى كفاءة حرارية بقيم تصل إلى 50 في المئة. ويبقى الكثير من عمل التطوير بحاجة إلى الإنجاز لكي يضمن أن غازات الاحتراق لن تضر التوربين الغازي بسبب جُسيمات الرماد المحمولة والناتجة من عملية الاحتراق.

إن كلاً من عمليتي تحويل الفحم الحجري إلى غاز (Gasification) وتسييله (Liquefaction) قد دُرستا بشكل مكثّف، واستخدمتا في الماضي لإنتاج الكربوهيدرات السائلة والغازية المشتقة من الفحم. وبسبب التوافر الكبير للمصادر التقليدية للنفط وللغاز في النصف الثاني من القرن العشرين، لم يتم استثمار هذه المصادر كثيراً. يمكن لهذه الحالة أن تتغير كثيراً مع النضوب المتزايد لهذه المصادر التقليدية وازدياد ثمنها، لذا يمكن للفحم الحجري أن يستخدم بكثرة

ثانيةً لإنتاج الوقود السائل والغازي. لقد كان تحويل الفحم إلى غاز مستخدماً منذ بدايات القرن التاسع عشر لإنتاج غاز من الفحم أو «غاز المدينة» (Town Gas)، وهو بشكل أساسي خليط ذو قيمة حرارية ضعيفة مكوّن من أول أكسيد الكربون والهيدروجين. ولإنتاج هذا الغاز يقوم محّول الفحم إلى غاز بتسخين الفحم الحجري بوجود الأكسجين والبخار، بحيث يتفكك الفحم إلى مزيج قابل للاحتراق من أول أكسيد الكربون والهيدروجين ونواتج أخرى. ويمكن بعد ذلك توزيع غاز المدينة القابل للاحتراق إلى المنازل والمصانع ليتم استخدامه للإنارة ولتأمين التدفئة والوقود للعمليات الصناعية. وقد تمَّ استبدال توليد وتوزيع هذا الوقود المهم في القرن العشرين نتيجة التوافر الكبير للغاز الطبيعي الذي يستخدم الآن كثيراً في العمليات الصناعية والتدفئة في الأبنية السكنية والتجارية، بالإضافة إلى توليد الكهرباء. إلا أن التقنية الأساسية لتحويل الفحم الحجري إلى غاز التي طُوّرت بالأصل لإنتاج غاز المدينة قد تم تعديلها وتحسينها للاستخدام في منشآت توليد الطاقة الكهربائية المعروفة بـ دورة التغويز المتكاملة (Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC) المُتطورة، ولإنتاج الغاز الصناعي (Syngas) كمادة أولية من أجل تركيب الوقود السائل في عمليات تحويل «الغاز- إلى- سوائل» (GTL).

مَكّنت عملية توليد الطاقة الكهربائية بواسطة (IGCC) غاز الفحم الحجري ليُستخدم كوقود من أجل التوربين الغازي، الذي يولّد الكهرباء ويوفّر أيضاً غازات العادم الحارة لتوليد البخار في مرجل لكي يستخدم لاحقاً في توربين بخاري تقليدي. يُقدَّم هذا التركيب لكل من التوربين الغازي والتوربين البخاري (الدارة المركّبة)، الذي هو مماثل للتركيب المستخدم في منشآت الطاقة الحديثة ذات الدارة المركّبة التي تعمل على الغاز الطبيعي، كفاءة أعلى بكثير من منشأة طاقة بسيطة بخارية تعمل على الفحم نوع (PF) بسبب درجات

الحرارة العالية المحققة في التوربين الغازي. وفي الحقيقة أنه عندما تتم في البدء معالجة الفحم إلى وسائط غازية يعني أن المواد الصلبة التي تبقى بعد تحويل الفحم إلى غاز هي في الأغلب رماد يبقى في المرجل عوضاً عن تمريره إلى الغلاف الجوي كمادة جسيمية. مع وصول الكفاءة الحرارية الكلية إلى 50 في المئة عوضاً عن أقل بقليل من 40 في المئة، كما هو الحال في منشأة الطاقة الكبيرة التي تعمل على الفحم المسحوق، تؤدي أيضاً الدارة المركّبة إلى تخفيض كبير في إنتاج غاز CO_2. في الوقت الحالي، تم فقط بناء محطات نموذجية قليلة، بشكل أوّلي، لتوضيح التكنولوجيا ولتعمل كوحدات اختبار لتقنيات جديدة في تحويل الفحم إلى غاز. ومع أعمال تطوير لاحقة لتخفيض كلفة منشآت (IGCC)، وازدياد كلفة الغاز الطبيعي، فإنها فقط مسألة وقت قبل أن تصبح محطات كهربائية مستقبلية عديدة ذات وحدات عالية الكفاءة، وتصبح (IGCC) تعمل على الفحم مع انبعاثات منخفضة. وإذا استخدم الأكسجين عوضاً عن الهواء كمؤكسد في حرّاق الفحم، فإن حجم تدفق الغاز (أو العادم) سينخفض كثيراً بسبب غياب النيتروجين الذي يشكل 80 في المئة تقريباً من الهواء المستخدم عادة في الاحتراق التقليدي أو التحويل إلى غاز. يتألف الغاز المتدفق رئيسياً من غاز CO_2 عالي التركيز، جاعلاً عملية فصل غاز CO_2 لغرض الحجز والتخزين (تناقش في الفقرة التالية) أسهل بكثير وأقل كلفة. إذا أصبح حجز الكربون وتخزينه الطريقة المقبولة للتعامل مع انبعاثات غاز CO_2 من منشآت توليد الطاقة الكهربائية من الفحم الحجري، بعدئذ سوف تكون أنظمة (IGCC) مناسبة أكثر بكثير من منشآت الفحم المسحوق التقليدية. هناك فائدة أخرى من التطور الجاري لحراقات هذه المنشآت وهي أنه يمكن استخدام التكنولوجيا في المستقبل لإنتاج الغاز الصناعي (Syngas)، إما كبديل عن الغاز الطبيعي، أو لإنتاج وقود سائل في منشأة تحويل الغاز إلى سوائل عندما يُطلب ذلك.

إن عملية تحويل الفحم الحجري إلى غاز تحت الأرض على المدى الطويل، حيث يتم تحويل الفحم الحجري في مكانه الطبيعي من دون الحاجة إلى استخراجه (من المنجم) المكلف والمثير للجدل بيئياً، يمكن أن تكون الطريقة المفضّلة لتحويل أجزاء كبيرة من مصدر الفحم مباشرة إلى غاز صناعي. يمكن أيضاً لهذه التقنية أن تستخدم من أجل الوصول إلى الفحم الحجري الذي يمكن أن يتعذّر الوصول إليه طبيعياً بسبب تواجده في أعماق كبيرة، أو أن إنتاجه ليس اقتصادياً بواسطة طرق الاستخراج التقليدية. ويعتبر تحويل الفحم الحجري إلى غاز تحت الأرض عملية «أكسدة جزئية» بسيطة إلى حدٍ بعيد حيث يُسخّن فيها الفحم لإطلاق المركّبات المتطايرة بواسطة الاحتراق المضبوط مع كمية هواء أقل من الكمية المستخدمة في الاحتراق التام. عملياً، تستلزم هذه العملية إحداث ثقبين متباعدين عن بعضهما بعضاً مسافة معينة، في الطبقات المجعّدة للفحم الحجري. يُنفخ بعدها الهواء أو الأكسجين في أحد طرفي الطبقة المجعّدة ليُحرق بعض الفحم الحجري جزئياً. بعد ذلك تحوّل الحرارة المولّدة باقي الفحم إلى غاز صناعي، ويمكن استخراج هذا الغاز الصناعي من الثقب الثاني لكي يُستخدم مباشرةً إما من أجل توليد الكهرباء أو لتركيب الوقود السائل. من ناحية المبدأ، تشبه هذه العملية عملية التحويل في المحوّل التقليدي للفحم الحجري إلى غاز، لكنها عملياً أكثر صعوبة بكثير من ناحية ضبط العملية نتيجة الحجم الكبير لطبقات الفحم الحجري المتجعّدة وتقلباتها. ظهر تحويل الفحم إلى غاز تحت الأرض أولاً في المملكة المتحدة وفي روسيا في العشرينيات والثلاثينيات من القرن الماضي، وبعدئذ تطور أكثر في الولايات المتحدة في السبعينيات. وبسبب الكلفة المنخفضة نسبياً للغاز الطبيعي، والصعوبة في التحكم بعملية تحويل الفحم إلى غاز تحت الأرض، لم تستمر هذه الطريقة إلى مرحلة الإنتاج التجاري الواسع. ومع التطور الإضافي والازدياد بأسعار الغاز الطبيعي، يمكن لهذه

التقنية أن تُثبت أنها فعالة جداً من ناحية الكلفة في إطلاق الطاقة المحتواة في المصادر الضَخمة للفحم الحجري التي لم تعتبر عادةً صالحة اقتصادياً.

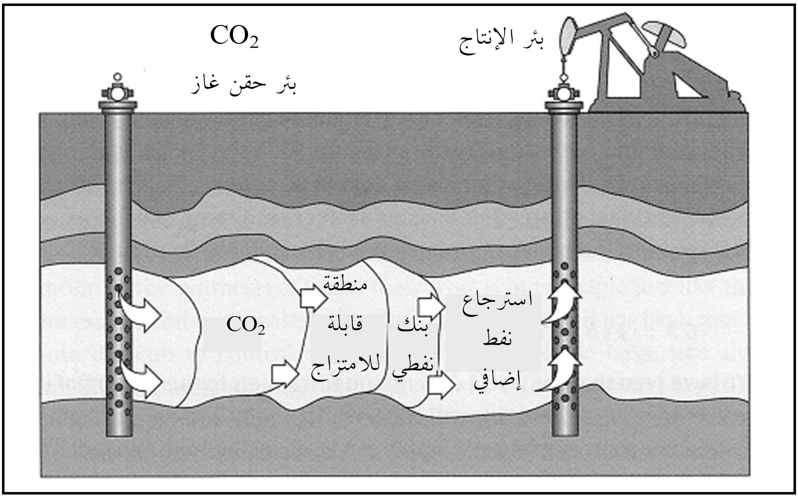
تمَ تطوير العمليات الأولى في العالم من أجل تسييل الفحم الحجري في ألمانيا خلال عشرينيات القرن الماضي لتضمن أنه يمكن التجاوب مع الطلب المتنامي سريعاً على منتجات البترول في بلدٍ ذي احتياطيات صغيرة جداً من النفط الخام، لكن مع وجود مصادر كبيرة من الفحم الحجري. إن عمليات هدرجة (Hydrogenation) الفحم وعمليات فسشر - تروبسش لتحويل الغاز إلى سائل كانت مستخدمة لتركيب الوقود السائل من الفحم الحجري ومن الغاز الصناعي المنتج بواسطة محوّل الفحم إلى غاز. هناك حوالى 24 منشأة من هذا النوع لإسالة الفحم تم بناؤها خلال الحرب العالمية الثانية كي لا تعتمد ألمانيا على النفط الخام لتأمين حاجات قواتها المسلحة. وعلى الرغم من تعطّل منشآت الهدرجة قبيل نهاية الحرب نتيجة قصف قوات الحلفاء، فإنها كانت قادرة على تأمين معظم بنزين الطيران ذي الجودة العالية المطلوب للقوة الجوية الألمانية (Luftwaffe) حتى عام 1944. إضافة إلى ذلك، فإن تركيب فسشر- تروبسش الأقل تطوراً كان قادراً على تزويد جزء مهم من وقود الديزل وزيوت المحركات المطلوبة للجيش وللنقل المدني. بعد الحرب، لم تعد هذه المنشآت منافسة اقتصادياً مع وجود عملية تكرير مخزونات النفط الخام غير المكلفة المتوافرة بشكلٍ متزايد، ولذلك تم التخلي عنها. إن شركة (SASOL) في جنوب أفريقيا هي المنشأة الوحيدة في العالم التي تستخدم هذه التكنولوجيا اليوم لإنتاج الوقود السائل من الفحم، بما فيه البنزين ووقود الديزل. تم بناء المنشأة في عصر التمييز العنصري عندما كانت حكومة جنوب أفريقيا مهتمة باحتمال حظر استيراد النفط، حيث كان سيشل الاقتصاد في بلد لا يملك احتياطيات طبيعية من النفط الخام. وتخدم هذه المنشأة الآن كواجهة عرض للعالم لهذه التكنولوجيا،

وتوضح أن التكنولوجيا متوافرة اليوم لإنتاج الوقود السائل مباشرة من الفحم الحجري. في عام 2004 أَنتجت منشأة (SASOL) أكثر بقليل من 5 مليون طن من الوقود السائل والغازي من الفحم الحجري. وبما أن مخزونات النفط التقليدي تصبح نادرة وأكثر غلاءً، يمكن أن نشاهد منشآت أكثر مماثلة لهذه تُنتج وقوداً أحفورياً تركيبياً سائلاً.

6. 3. تلطيف الكربون

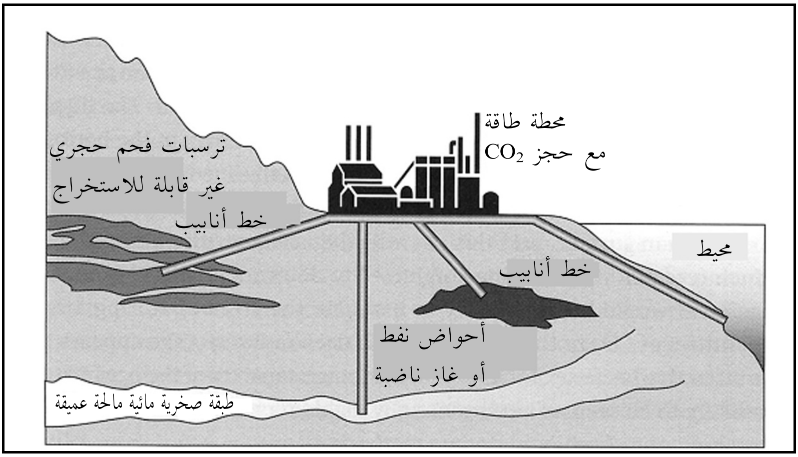
رأينا أن العالم يعتمد على الوقود الأحفوري بحوالى 80 في المئة من مجمل احتياجاته للطاقة، وسوف يستمر ذلك لعقود عديدة إلى أن يتم تطوير مصادر أكثر استدامة لمخزون الطاقة وتوسعها لتعمل كبدائل. النتيجة النهائية لكل استخدامات الطاقة الأحفورية هي تحويل الكربون في الوقود إلى غاز CO_2 الذي يُطلق عادةً في الغلاف الجوي. نتيجة ذلك، يوجد الآن اهتمام كبير بتأثير الانبعاثات العالمية لغاز CO_2 الذي يُنتج 6 مليارات طن من الكربون بالسنة، كما رأينا في الفصل الثالث. وهكذا بدأ المهندسون والعلماء بالنظر إلى إمكانيات تخفيض كمية غاز CO_2 المتدفقة إلى الغلاف الجوي باستخدام طرق معروفة بـ«حجز الكربون وتخزينه»، أو «فصل الكربون». إن تطوير هذه التقنيات هو في مراحله المُبكرة جداً، لكن قد تكون إحدى الطرق لتمديد الاستعمال المستمر للوقود الأحفوري، طالما يمكننا تخفيض انبعاثات غاز CO_2 في الوقت نفسه في الغلاف الجوي.

إن عملية استخدام غاز CO_2 من أجل تدعيم استخراج النفط من الآبار التقليدية هي تقنية مثبتة مسبقاً. كما هو مبيّن في مخطط الشكل (6-2)، فإن فكرة استخراج النفط المدعمة (Enhanced Oil Recovery - EOR) باستخدام غاز CO_2 هي بسيطة فعلاً. حيث يتم تمرير كمية مضغوطة من غاز CO2 عبر أنبوب إلى منطقة بعيدة نسبياً عن رأس البئر، ومن ثم تُحقن في التشكيلات المحتوية على النفط. يعمل بعدئذٍ



الشكل (6-2): عملية استخراج النفط المُدعمة (EOR).

الغاز المضغوط على دفع النفط المتبقي في التشكيل المسامي باتجاه فوهة صناعية موجودة، حيث يُستخرج بعد ذلك بواسطة مضخة رأس بئر عادية. إن استخراج النفط بهذه الطريقة هو أكثر كلفة بالمُقارنة مع بئر إنتاج تقليدي، لكن تستطيع عملية (EOR) أن تطيل بشكل مهم عمر حقل النفط المستنفد جزئياً، مع استخدام أفضل لأدوات الإنتاج الموجودة سابقاً. مع أن هذه العملية لم تصمم بالأساس لتخزين أو فصل غاز CO_2، لذا يتم عادة تغطية بئر الإنتاج قبل أن تبدأ كميات كبيرة من غاز CO_2 بالنفاد من رأس البئر. في هذه الحالة، حالما تكتمل عملية (EOR)، تحصل فائدة ثانوية وهي عبارة عن حجز غاز CO_2 وتخزينه في بنية النفط المُستنفد. وتم تطبيق استخدام غاز CO_2 في عملية (EOR) بشكل كبير في الولايات المتحدة الأميركية، وبحسب وكالة الطاقة الدولية، تستخدم حالياً كمية حوالى 33 مليون طن من غاز CO_2 بالعام لحوالى 75 عملية (EOR). توفّر هذه العملية قالباً لشكل من أشكال حجز وتخزين الكربون المقترح من قبل مجموعة من المهندسين والعلماء.



الشكل (6-3): أفكار تخزين الكربون

يبيّن الشكل (6-3) المدى الكامل لتقنيات تخزين الكربون كما يتصوره الباحثون. يتم أولاً فصل انبعاثات غاز CO_2 من محطة طاقة كهربائية، أو من بعض العمليات الأخرى المستهلكة للوقود الأحفوري، عن غازات الاحتراق المُتدفقة في عادم أو مدخنة المُنشأة، بعدئذ تُخزّن باستخدام إحدى الأفكار الأربع المُختلفة والمبيّنة في الشكل. تشمل ثلاثة من هذه الأفكار تخزيناً جيولوجياً لغاز CO2، بينما الفكرة الرابعة تستخدم المحيط العميق كوسط للتخزين. في الحالة الأولى، يمكن ضغط الغاز ونقله بالأنابيب إلى حوض النفط أو الغاز المستنفد، بالطريقة نفسها التي استخدمت في عملية (EOR). في هذه الحالة يتم استعمال الحوض المُستنفذ ليُخزّن داخله غاز CO_2 حيث إنه لا يحتوي الآن على أي مصادر صالحة اقتصادياً من النفط أو الغاز. من المتوقع أن تكون أحواض الغاز المستنفدة هي المرشحة المناسبة خصوصاً لهذا الغرض، لكونها احتوت بنجاح مصدراً ضخماً من الغاز لعدة آلاف من السنين بدون تسريب واضح إلى المحيط الخارجي. تدعم وكالة الطاقة الدولية حالياً مشروع محاولة حجز الكربون وتخزينه في كندا، حيث يتم ضخ 5000 طن باليوم من غاز CO_2 عبر أنابيب من منشأة تحويل الفحم

الحجري إلى غاز عبر الحدود في شمال داكوتا، وبعدئذ تُحقن إلى حقل نفط مهجور في ويبورن، ساسكاتشيوان. سوف تستخدم المراقبة المستمرة وتجميع البيانات لرؤية فيما إذا كان هذا هو الموقع المُناسب لتخزين الكربون، ولتأمين بعض المعلومات القيمة عن تكاليف هكذا عملية.

قدّر العلماء بطريقة مشابهة، أن الطبقات الصخرية المائية تحت الأرض، مع الكميات الضخمة من الماء المحجوز، يمكن أن تكون مستودعات مناسبة لتخزين كميات كبيرة من غاز CO_2، وكذلك تم اقتراح طبقات الفحم غير المستخدمة كمواقع تخزين مناسبة. يمكن بصورة طبيعية محاولة استخدام الطبقات المائية المالحة لتخزين غاز CO_2 لأن هذا الماء لن يكون قابلاً للاستعمال لأي غرض آخر. سوف ينحل الغاز في الماء، ومع الزمن يمكن أيضاً أن يتفاعل ليشكل مواد كربونية صلبة تفصل الكربون بشكل دائم. وفي محاولة اختبارية لهذه الطريقة، تم فصل مليون طن تقريباً بالعام من غاز CO_2 عن الغاز الطبيعي المُنتج في حقل سليبنر (Sleipner) النرويجي في بحر الشمال، ومن ثم تم ضخه بالأنابيب إلى طبقة صخرية مائية مالحة عميقة تحت أرض البحر. إن الفائدة من استخدام طبقات الفحم غير القابلة للاستخراج هو أن معظم ترسّبات الفحم الحجري تحتوي عادةً كمية كبيرة من الميثان أو «ميثان طبقة - الفحم» ، التي تُحجز في البنية المسامية للفحم الحجري. يمكن لحقن غاز CO_2 في طبقة الفحم، بالتزامن مع وجود آبار استخراج غاز متموضعة بشكل مناسب، أن يدفع الميثان بطريقة مماثلة لتلك المستخدمة في عملية (EOR). بعدئذٍ يَحل غاز CO_2 محل الميثان في طبقة الفحم، الذي هو مصدر وقود ثمين عندما يتم استخراجه.

أخيراً، هناك نظرة مأمولة ذات مدى أطول من أجل تخزين غاز CO_2 وهو نقله بالسفن أو بخطوط الأنابيب للتخزين في المحيط العميق. تم طرح فكرتين من أجل التخزين في المحيطات العميقة،

وهما قيد الدراسة تحت رعاية وكالة الطاقة الدولية. في الطرح الأول يُحقن غاز CO_2 مباشرة إلى المحيط عند نصف العمق تقريباً لينتشر بشكل واسع ما أمكن لينحل بعد ذلك في مياه البحر. أما الطرح الثاني فهو يعتمد على ضخ سائل CO_2 ليملأ المنخفضات في قاع المحيط العميق. عند ضغط ودرجة حرارة الماء على أعماق أكبر من حوالى 3000 متر، سوف يبقى CO_2 كسائل ذي كثافة أعلى من كثافة الماء. بعدئذٍ يشكّل سائل CO_2 «بحيرة مستقرة»، ومن المفترض أن يبقى في قاع المحيط مع انتشار بحده الأدنى إلى المياه المحيطة. وفي كلتا الحالتين، من المتوقع أن يحصل بعض «التسرّب» لغاز CO_2 إلى سطح المحيط، وهذا الغاز سوف يدخل من جديد بعدئذٍ إلى الغلاف الجوي. وتُجرى الآن بحوث كثيرة لتحدد ما ستكون عليه معدلات التسرب هذه، ولتحاول تقدير كلفة تخزين كميات كبيرة من غاز CO_2 بهذه الطريقة. على الرغم من أن التخزين في المحيط العميق يبدو جذاباً بسبب سعة التخزين الكبيرة جداً للمحيط، من غير المتوقع أن تبدو هذه الطريقة ذات فائدة اقتصادية حتى بعد تطوير طرق التخزين الجيولوجية.

إن إحدى التحديات الرئيسة لتطبيق حجز الكربون وتخزينه هي صعوبة فصل غاز CO_2 بكفاءة عن تيار غاز العادم. وفي معظم عمليات احتراق الفحم يشكّل غاز CO_2، 12 في المئة تقريباً من إجمالي حجم غاز الاحتراق، الذي يتألف بشكلٍ رئيس من: غاز CO_2، آزوت (نيتروجين) وبخار ماء. وإن الآزوت الذي يشكّل حوالى 79 في المئة من حجم الهواء لا يتفاعل في عملية الاحتراق ويبقى بقدر كبير العنصر الأكبر من غازات الاحتراق. بعد ذلك يصبح فصل غاز CO_2 عن الآزوت وبخار الماء تحدياً بسبب حجم الغاز الكبير جداً ومتطلبات القطع الضخمة للمعدات. هناك مفهومان رئيسان تم طرحهما بالنسبة إلى حجز غاز CO_2 الناتج من عملية الاحتراق، ويشار إلى هذين المفهومين بتقنيات «بعد الاحتراق» و«قبل الاحتراق».

في تقنية بعد - الاحتراق، الأكثر تطوّراً يستخدم جهاز لغسل الغاز المحترق (Scrubber) لفصل غاز CO_2 عن باقي غازات الاحتراق باستخدام مذيب مناسب. في المنشآت التجريبية العاملة اليوم عند درجة قريبة من الاقتصادية، يستخدم وحيد - الإيثانولامين (Mono-ethanolamine) ليَمتص غاز CO_2 من غاز الاحتراق ويُسخّن بعدئذٍ السائل الناتج ليُطلق غاز CO_2 النقي تقريباً والجاهز للنقل إلى موقع تخزين مناسب. بسبب الحجوم الكبيرة جداً لغاز الاحتراق، يحتاج جهاز غسل الغاز ليكون كبيراً جداً، وهو فعلاً جهاز غالي الثمن. تتطلب عملية تسخين المحلول لتحرير غاز CO_2 أيضاً كمية من الطاقة، ما يؤدي إلى انخفاض إجمالي الكفاءة الحرارية للمنشأة. هناك مذيبات أخرى قيد الاستقصاء لتبين إذا كان ممكناً تخفيض متطلبات الطاقة، وكذلك تم الاستقصاء عن العَمليات التي تستخدم أغشية فلزية مسامية (Filter) لتُرشّح مباشرة غاز CO_2 من تيارات غاز الاحتراق. إلا أن هذه التقنيات هي في مراحل مبكرة من التطور، وتحتاج أعمال بحث وتطوير أكثر قبل إثبات أنها صالحة فنياً ومجدية من ناحية الكلفة.

في مفهوم بعد الاحتراق يمكن أن يُخَفض كثيراً حجم غاز الاحتراق الذي يحتاج معالجة إذا استخدم الأكسجين النقي كمؤكسد في عملية الاحتراق بدلاً من الهواء. في هذه الطريقة يوجد القليل من الآزوت أو عدمه، ما يخفّض كثيراً حجم غازات الاحتراق التي تحتاج إلى معالجة، وبذلك إلى تخفيض في حجم وكلفة التجهيزات. وإذا استُخدم الأكسجين محل الهواء، تكون درجات حرارة الاحتراق أعلى بكثير، لأنه لا يوجد آزوت ليعمل كماصٍّ للحرارة. في الواقع، إن درجات الحرارة هي عالية جداً بحيث استخدمت هذه العملية في مشعل الأكسي - أسيتيلين (Oxy-acetylene) المستخدم لقطع الفولاذ. ولذلك، في هذه، الحالة يتم تدوير بعض، من غاز CO_2 المنتج في عملية الاحتراق ويعاد إلى بداية العملية ويتم تغذيته إلى حجرة

الاحتراق سويةً مع الأكسجين النقي. بعدئذٍ يعمل غاز CO_2 كغاز خامل «مصرِّف للحرارة» خلال عملية الاحتراق، وبذلك يُخفّض درجات حرارة الاحتراق إلى مستويات يمكن التعامل معها، بالطريقة نفسها التي يعمل بها الآزوت في عملية احتراق تقليدية باستخدام الهواء كمؤكسد. هذه العملية هي نوع عملية «إعادة تدوير غاز العادم» المستخدمة عادةً لتخفيض درجات حرارة الاحتراق في محركات السيارات لكي يتم تخفيض تشكل مركّبات أكسيد الآزوت. ويُخفّض التخلص من الآزوت في غازات الاحتراق بشكل كبير حجم وكلفة التجهيزات المطلوبة، لكن يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار مقابل ذلك الكلفة المضافة لتزويد الأكسجين النقي الذي يتم الحصول عليه عادةً من منشأة فصل للهواء، التي تتطلب أيضاً كمية معتبرة من الطاقة. هناك حاجة إضافية أكثر إلى التطوير، وحاجة إلى بناء منشأة تجريبية للدراسة حيث يتم تحديد ما إذا كانت فوائد الاحتراق الغني بالأكسجين تُرجح على التكاليف وغرامة الطاقة للتزوّد بالأكسجين.

في مفهوم قبل الاحتراق يتم استبدال عملية الاحتراق المعتادة بواسطة الأكسدة الجزئية، أو عملية التحويل إلى غاز. هذه هي العملية نفسها المستخدمة لإنتاج الغاز الصناعي كمادة تدخل في تركيب الوقود السائل، لكن في هذه الحالة يكون الهدف هو إنتاج وقود غازي نظيف الاحتراق للاستعمال في التوربين الغازي، بينما يتم في الوقت نفسه تحويل جميع الكربون في الوقود إلى تيار من غاز CO_2 النقي الذي يمكن بعدئذٍ أن يُجمع للتخزين. تستخدم عملية الأكسدة الجزئية أولاً الأُكسجين في «المُحوّل إلى غاز» لتحويل الوقود (عادة الفحم الحجري) إلى مزيج غاز صناعي نموذجي من أول أكسيد الكربون CO وهيدروجين. يتفاعل بعدها غاز CO مع البخار في وعاء ثانٍ باستخدام تفاعل «تبديل ماء غاز» لتحويل غاز CO إلى غاز CO_2 وأكثر هيدروجين. ثم يتم فصل غاز CO_2 عن الهيدروجين باستخدام

إحدى الطرق المشروحة آنفاً، ويمكن حرق الهيدروجين مع الهواء في حجرة احتراق التوربين الغازي. بعدئذٍ يكون غاز عادم التوربين الغازي مكوّناً بشكل رئيس من خليط من بخار الماء والآزوت، ويستخدم هذا الغاز الحار لتوليد بخار في مرجل من أجل استخدامه في توربين بخاري. إن عملية الدارة المركبة هذه هي عملية (IGCC) التي ذكرناها مسبقاً، وهي تستخدم لتوليد الكهرباء بكفاءة حوالى 50 في المئة، كفاءة قريبة من كفاءة منشأة الدارة المركّبة التي تعمل على الغاز الطبيعي. إن الفائدة من عملية (IGCC)، هي أنها قادرة على استخدام وقود فحم حجري مُنخفض الجودة لتوليد الكهرباء بكفاءة وإنتاج تيار مركّز من غاز CO_2 من أجل التخزين لاحقاً. تتطلب، هذه العملية كذلك عادةً أُكسجين نقي لتغذية «المُحول إلى غاز»، وهناك حاجة الأخذ بالحسبان كلفة واستهلاك الطاقة في منشأة إنتاج الأُكسجين عند تقدير الجوانب المالية للعملية ككل.

في الوقت الحالي يوجد مقدار كبير من البحث والتطوير قيد الإنجاز يجري على جميع هذه العمليات وإنه لقريب جداً أن نرى «رابحاً». يُفترض أن يصبح ممكناً خلال العقد التالي، تمييز عملية واحدة أو أكثر من هذه العمليات بأنها الأكثر صلاحية فنياً ومجدية اقتصادياً، لتسهّل حجز وتخزين غاز CO_2 عند استخدام الفحم الحجري لتوليد الكهرباء بكفاءة عالية. وقَدّرت وكالة الطاقة الدولية، في دراسات هندسية، أنَ التكاليف التقليدية لإضافة حجز وتخزين غاز CO_2 لمنشأة طاقة كهربائية تعمل على الفحم الحجري سوف يزيد كلفة الكهرباء ما بين 50 و100 في المئة، ويعتمد هذا على التقنية المستخدمة في النهاية وعلى كلفة الوقود. وعلى الرغم من أن هذه التكاليف جوهرية، إلا أنها تطرح التساؤل ما إذا كنّا جديين حول تحقيق احتياجات الطاقة المتنامية باستخدام مصادر الفحم الحجري ذات الكلفة المنخفضة والمتوافرة على نطاقٍ واسع من دون إضافة غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي.

المراجع

Books

Davidson, J., P. Freund, and A. Smith, "Putting Carbon Back in the Ground."

International Energy Agency (IEA) Greenhouse Gas R&D Programme, 2001.

Websites

Alberta Energy and Utilities Board (AEUB) (2005). <http://www.eub.gov.ab.ca/bbs/default.htm>.

Canadian Association of Petroleum Producers (2005). <http;www.capp.ca/>.

Canadian National Energy Board (2005). <http://www.neb-one.gc.ca/index_e.htm>.

SASOL (2005). <http://www.sasol.com/sasol_internet/frontend/navigation.jsp?navid=lEpnav=sasolEcnav=assol>.

Suncor (2005). <http://www.suncor.com/star.aspx>.

Syncrude (2005). <http://www.syncrude.ca>.

US Geological Survey (USGS) (2005). <http://www.usgs.gov/>

World Energy Council (2005). <http://www.worldenergy.org/wec-geis/default.asp>.

7 ـ مصادر الطاقة المُتجددة

7. 1. مقدمة

إن مصادر الطاقة المتجددة هي بشكل أساسي تلك المصادر التي لا تنضب في الطبيعة، المشتقة جوهرياً من الطاقة الإشعاعية للشمس التي تصل إلى الأرض. تتضمن هذه المصادر الأمثلة الواضحة للمحطات الكهرومائية، ومحطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، بالإضافة إلى بعض الأمثلة غير الواضحة بالفعل، مثل النفايات المتجددة القابلة للاحتراق والوقود الحيوي مثل الإيثانول المشتق من محاصيل الحبوب. إضافةً إلى ذلك، هناك مصادر كالطاقة الجيوحرارية وطاقة تدرُّج (Gradient) درجات حرارة المحيط، اللتين يتم اشتقاقهما من الكميات الكبيرة جداً من الطاقة الحرارية المخزّنة في قشرة الأرض والمحيطات، واللتين تصنفان كطاقتين «متجددتين» رغم أنه من الواضح أن هذه الأنواع من الطاقة ليست مستدامة بشكل تام على المدى الطويل. بالطبع، إذا أخذنا مجالاً زمنياً من ملايين (أو مليارات) السنين، حتى الطاقة الإشعاعية للشمس سوف تنقص وبالتالي ليس هناك واحد من هذه المصادر مستدام حقاً «بشكل دائم». بعدئذٍ، يصبح تعريف «متجدد» هو نوعاً ما كيفياً لكن بشكل واضح هي جميع المصادر التي يفترض أن تبقى متوافرة لأجيال المستقبل لآلاف السنين منذ الآن، وليس فقط خلال مئات السنوات القليلة التالية، كما هو الحال بالنسبة إلى المصادر «غير المتجددة» كالوقود الأحفوري. حتى الطاقة النووية، المعتمدة على التكنولوجيا المستخدمة للتوصل إلى الطاقة في الوقود النووي، اعتبرت أحياناً

متجدّدة لأنه من المتوقع أن تبقى متوافرة خلال زمن أطول بكثير مقارنةً بالطاقة المشتقة من الوقود الأحفوري. سوف نعتبر الطاقة النووية على أنها تتبع صنفاً منفصلاً من مصادر الطاقة «المستدامة»، والتي سوف يتم وصفها في الفصل التالي. هناك اعتبارات مهمة أخرى لجميع أشكال الطاقة المستدامة وهي أن استخدامها لن يسهم بشكل طبيعي في ازدياد التركيز الجوي لغازات الدفيئة كغاز CO_2.

هناك ميزة مهمة لمعظم مصادر الطاقة المتجددة لكن ليس جميعها، وهي «كثافة الطاقة المنخفضة» أو الطاقة المتولّدة بوحدة مساحة السطح. مثلاً، إن لكل من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح لها كثافة طاقة منخفضة، ما يعني أن كميات صغيرة نسبياً من الطاقة متوافرة من كل متر مربع من مساحة سطح الأرض. ومن الملاحظ أن ذلك غير صحيح تماماً، ففي الطاقة الكهرومائية، كما في هذه الحالة، مَكنت طاقة الإشعاع الآتية من الشمس نظام البيئة العالمي وجغرافية الأرض من «تركيز» الطاقة. ويتم الحصول على القدرة في المنشأة الكهرومائية من الطاقة الكامنة المخزّنة في كتلة الماء الضخمة المتواجدة في موقع مرتفع (حوض التخزين)، التي تستخدم لإدارة توربينات عندما تسقط إلى مستويات أقل ارتفاعاً. تتم تعبئة الحوض باستمرار نتيجة هطول مياه الأمطار التي تُجمع من فوق مساحة كبيرة جداً، ومن ثم تجري بواسطة نظم الجغرافيا الطبيعية والأنهار لتعود إلى حوض التخزين. لكي نستخدم الطاقة الشمسية مباشرة، يجب أن تُعترض أشعة الشمس فوق مساحة كبيرة جداً لأن مساحة التشميس (Insolation)، أو قدرة الإشعاع الشمسي الوارد إلى سطح الأرض هي فقط حوالى 1.37 كيلو واط بالمتر المربع خارج الغلاف الجوي للأرض. وبسبب امتصاص الغلاف الجوي لجزء من طاقة الإشعاع، تنخفض هذه الكمية إلى قيمة عظمى حوالى 1 كيلو واط بالمتر المربع عند سطح الأرض في يوم صحو، وذلك بحسب الفترة الزمنية من السنة وبحسب المكان. هذه القدرة كافية لتغذية 10 مصابيح

كهربائية من فئة 100 واط، لكن بما أن اللوحات الفولتضوئية المستخدمة لتوليد الكهرباء مباشرة من أشعة الشمس يمكن أن تمتلك متوسط كفاءة حوالى 10 في المئة فقط، فإن متراً مربعاً من لوحة فولتضوئية سيكون قادراً على تغذية مصباح ضوئي وحيد في يوم صحو. أما خلال الفترات الغائمة فتبقى الطاقة الشمسية متوافرة، لكنها تكون أقل بكثير مما هي عليه في فترات الصحو، وبالطبع ليس هناك أي طاقة شمسية متوافرة خلال الليل. وهكذا فإن قيمة المتوسط السنوي للطاقة الشمسية الساقطة على سطح الأرض تكون أقل بكثير من تلك المشار إليها بالاعتماد على قيمة ذروة الإشعاع الشمسي، وتتغير بشكل كبير بحسب خط العرض والمناخ المحليين. مثلاً، قدّر المخبر الوطني لأبحاث الطاقة المتجددة في الولايات المتحدة عام 2005 أن قيمة المتوسط السنوي للطاقة الشمسية في الولايات المتحدة تتغير ضمن مجال يتراوح بين حوالى 4 كيلو واط ساعة بالمتر المربع باليوم في المناطق الشمالية والغائمة، وحوالى 7 كيلو واط ساعة بالمتر المربع باليوم في المناطق الجنوب - غربية المشمسة. ويمكن استخدام الطاقة الشمسية مباشرةً ليس فقط لإنتاج الكهرباء ولكن أيضاً للتدفئة في الأبنية السكنية والأبنية التجارية. شكّلت تلبية هذه المتطلبات نوعاً ما مشكلة، إذ إن الفصل الذي نحتاج فيه إلى التدفئة يتوافق عادةً مع الفترة التي يكون فيها توافر الطاقة الشمسية عند قيمته الدنيا. مع ذلك، وبمساعدة بعض أنواع تخزين الطاقة، أو بوجود أبنية مصممة لتشمل الطاقة الشمسية «غير-الفعّالة» (Passive)، هناك جزء كبير من متطلبات التدفئة السنوية يمكن الحصول عليه من الطاقة الشمسية.

بشكل مماثل، تتميز طاقة الرياح أيضاً بكثافة طاقة منخفضة على الرغم من وجود بعض الأماكن ذات الرياح القوية التي لديها مصادر طاقة رياح أعلى بكثير من المناطق الأخرى. كذلك، باستخدام مثال الولايات المتحدة الأميركية، إن المتوسط السنوي لطاقة الرياح يقع

ضمن مجال حدّه الأدنى أقل من 200 واط لكل متر مربع في المنطقة الجنوبية - الشرقية من هذا البلد، وحدّه الأعلى أكبر من 800 واط لكل متر مربع في منطقة جبال روكي. وبما أن قوة الرياح القريبة من سطح الأرض تزداد مع الارتفاع فوق مستوى السطح بسبب طبيعة الطبقة الحدّية الأرضية، تم أخذ هذه البيانات كمعيار عند ارتفاع 50 متراً، التي تتوافق مع متوسط سرعة رياح أقل من 5.6 متر بالثانية كحد أدنى إلى حوالى 8.8 متر بالثانية كحد أعلى. تتوزع طاقة الرياح على سطح الأرض بشكل أقل تماثلاً من الطاقة الشمسية، ويمكن أن تكون تجمعات مصادر طاقة الرياح العالية في الولايات المتحدة بعيدة عن مراكز الحمل الرئيسة على كلا الساحلين وفي المنطقة الغربية - الوسطى حول منطقة البحيرات الكبيرة (Great Lakes).

في أقسام لاحقة من هذا الفصل، سوف ندرس بتفصيل أكثر المصادر القابلة للاستخدام من أجل الحصول على كل من الطاقة الشمسية والطاقة الرياحية، بالإضافة إلى تكنولوجيات أقل تطوراً مصممة لاستخراج الطاقة بشكل غير مباشر من الشمس.

7. 2. الطاقة الشمسية

7. 2. 1. أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية

هناك طريقة واحدة لاستخدام الطاقة الشمسية وهي باستخدامها مباشرة كمصدر للطاقة الحرارية، إما لتأمين التدفئة للأبنية السكنية والتجارية، أو لتوليد الكهرباء باستخدام دورة رينكين (Rankine) البخارية التقليدية. كما رأينا، تستخدم كمية كبيرة من الطاقة لتأمين متطلبات الراحة الأساسية في المنازل، وفي بلدان خطوط العرض الوسطى كثيفة السكان، تستخدم هذه الطاقة بشكل أساسي للتدفئة خلال أشهر الشتاء. وإن استخدام كل من نظم الطاقة الشمسية الحرارية الفعّالة (Active) وغير الفعّالة (Passive) بالنسبة إلى هذه

التطبيقات يمكن أن توفر تخفيضاً كبيراً في الاحتياج إلى مصادر الطاقة الرئيسة غير المتجددة. تعود التدفئة الشمسية غير الفعّالة ببساطة إلى تقنيات التصميم المعماري التي تمكّن بنية البناء من امتصاص الطاقة الشمسية بأكبر قدر ممكن خلال ساعات النهار في أشهر الشتاء، ثم استخدام هذه الطاقة «المُخزّنة» لتحل مكان الحرارة التي كانت ستوفَّر عادةً بواسطة السخّانات التي تعمل على الوقود الأحفوري، أو بواسطة السخّانات الكهربائية. هناك أفكار تصميمية يمكن أن تكون بسيطة بحيث تضمن تصغير النوافذ على واجهات البناء الشمالية وتكبيرها على واجهات البناء الجنوبية، وبذلك سوف يدخل أكبر قدر ممكن من أشعة الشمس إلى البناء ويسخّن عناصر البناء كالجدران الداخلية وأرض الغرف.

تم استخدام أفكار تصميمية أكثر تعقيداً أيضاً لتزيد هذا التسخين غير الفعّال، شاملةً استخدام جدران ترومب (Trombe Walls) مثلاً. هذه الجدران ثقيلة، وعادةً إسمنتية ومطلية بالأسود وموضوعة خلف زجاج الواجهة الجنوبية المستخدمة بشكل خاص لامتصاص أكبر قدر ممكن من أشعة الشمس، وبذلك يمكن إطلاق هذه الطاقة الشمسية الحرارية على مدى فترات من ساعات عدة. يعمل الزجاج أمام الحاجز كبيت زجاجي لحجز أكبر قدر ممكن من الطاقة الشمسية، وبعدئذٍ يسمح للهواء بالدوران عبر الفتحة بين الزجاج والجدار الإسمنتي. بعد ذلك يمتص الهواء الدائر الحرارة التي تم تخزينها في الحائط وينقلها إلى أجزاء أخرى من الغرفة، أو حتى إلى أجزاء أخرى من المنزل. وتكون بنية الجدار الهائلة قادرة على امتصاص طاقة كافية بحيث إن الحرارة تستطيع الانتقال إلى الهواء الدائر لساعات عدة بعد غروب الشمس. حتى إن بعض التجهيزات تضمنت ستائر داخل الزجاج بحيث إنها تُغلَق أوتوماتيكياً خلال الليالي الباردة لكي تخفِّض الطاقة التي كانت ستضيع بإعادة إشعاعها عبر النافذة.

يَستخدم التسخين الشمسي الفعّال مجمّعات شمسية تُثبَّت عادةً على أسقف الأبنية السكنية، لتُسخّن الماء أو سائل آخر يدور بعدئذٍ في أجزاء أخرى من البناء. يمكن أيضاً استخدام هذه المجمّعات الشمسية الفاعلة كمَصدر للماء الساخن في المساكن، أو لتوفير الحرارة مباشرةً لحوض السباحة. وفي حالة حوض السباحة المَكشوف، تكون هذه التطبيقات بشكل خاص جذّابة لأنها تستخدم عادةً خلال أشهر الصيف الدافئة عندما تكون الكمية العظمى من الإشعاع الشمسي متوافرة. تتأثر الجوانب المالية للتسخين الشمسي للماء بكلفة مصادر طاقة أخرى مستخدمة لهذا الغرض، بشكل رئيس: الكهرباء والغاز الطبيعي، وموقع البناء. مثلاً، في الولايات المتحدة يعتبر التسخين الشمسي لأحواض السباحة مناسباً بالأخص في الولايات المُشمسة مثل كاليفورنيا وفلوريدا اللتين يوجد فيهما كثير من أحواض السباحة المَكشوفة. في معظم المنشآت المستخدمة لتزويد المنازل بالماء الحار أو أحواض السباحة، يتم تركيب نظام تسخين ماء تقليدي يستخدم الغاز الطبيعي أو الكهرباء ليوفر طاقة مساندة خلال الطقس الغائم أو عندما يُفضي الطقس البارد إلى طلب إضافي على الماء الحار. على أي حال، في كثير من الحالات، يمكن توفير أكثر من نصف كلفة مصادر الطاقة التقليدية على مدى سنة باستخدام الطاقة الشمسية، وفي بعض الحالات أكثر من ذلك. إن تكلفة النظام الشمسي هي أيضاً معتدلة إلى حد معقول، حيث يمكن أن تكون الفترة الزمنية لاسترجاع رأس المال (Financial Payback Time) أقل من 10 سنوات، ما يجعل الطاقة الشمسية الحرارية استثماراً جذاباً.

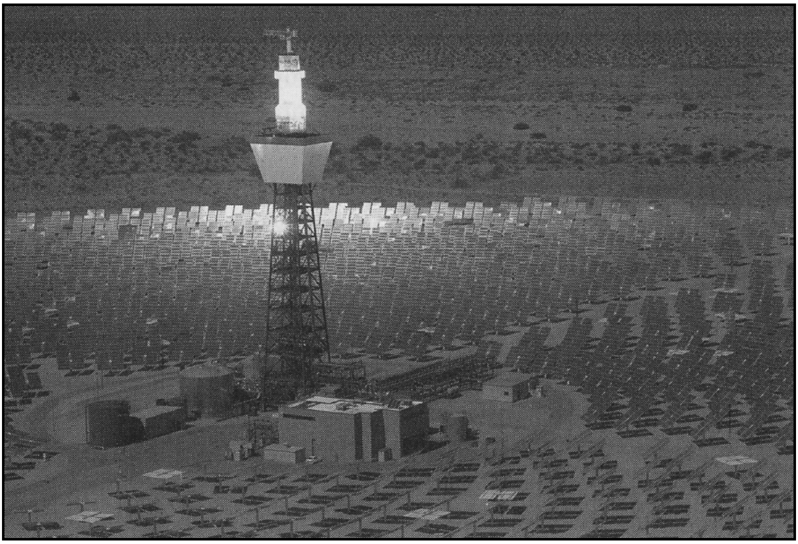
أخيراً، إن «المجمعات الشمسية التركيزية» هي منشآت طاقة شمسية حرارية فعّالة، تستخدم عادةً لتوليد الكهرباء باستطاعات كبيرة إلى حد ما. وتستعمل هذه الأنظمة مرآة واحدة أو أكثر من المرايا العاكسة لتركيز حزمة من أشعة الطاقة الشمسية على نقطة محرقية لكي

توفر مصدراً من الطاقة الحرارية ذا درجة حرارة عالية. يمكن لاستخدام عدد كبير من المرايا فوق مساحة كبيرة أن يوفر مصدراً قليل الكلفة نسبياً من الطاقة المُركزة المناسبة لتسخين الماء أو أي مائع آخر إلى درجة حرارة عالية. يُمكن، بعد ذلك، أن تستخدم هذه الطاقة الحرارية، ذات درجة الحرارة العالية، إما لتشغيل محرك الهواء الحار، أو محرك «ستيرلينغ» (Stirling Engine)، أو لتأمين بخار يتم استخدامه في منشأة توليد بخارية تقليدية، حيث في كلتا الحالتين تتم في النهاية إدارة مولد كهربائي. بالطبع، يمكن استخدام هذا النوع من الأنظمة لتأمين مصدر للطاقة الحرارية خلال ساعات النهار فقط، مع العلم أن بعض الأنظمة الكبيرة تحتوي على نظام تخزين حراري بحيث تستطيع الاستمرار بتوليد الكهرباء لبعض الوقت خلال الفترات الغائمة أو حتى في الليل. إذا كان المطلوب المصدر الثابت والمستمر للكهرباء، فيمكن أن يتطلب ذلك أيضاً نظاماً احتياطياً من أجل التطبيقات المستقلة أو المعزولة عن الشبكة الكهربائية العامة. لقد تمَ استخدام نظام هجين يَعتمد على الغاز الطبيعي كوقود احتياطي لتوفير توليد مستمر للكهرباء، حتى خلال الليل في المُنشآت التجريبية الكبيرة القائمة إلى غاية اليوم في الولايات المتحدة. وإن أحد محاسن استخدام الأنظمة الشمسية في المناخات المشمسة الحارة هو أن فترة التوليد الكهربائي العظمى تتوافق بشكل متقارب مع فترة ذروة الطلب على تكييف الهواء. وقد تم أيضاً اقتراح أنظمة أصغر باستخدام مرآة قطع مُكافىء (Parabolic) مع محرك «ستيرلينغ» عند نقطة المحرق كطريقة محتملة لتأمين الكهرباء للتجمّعات الريفية الصغيرة في البلاد النامية، خصوصاً بالنسبة إلى تلك المناطق ذات المستوى العالي من الإشعاع الشمسي.

تم تأمين الدعم المادي عن طريق جهات حكومية أو وكالات أبحاث لتجهيزات أكبر مستخدمةً مصفوفات من المرايا تغطي مساحات كبيرة، حيث تم بناء هذه التجهيزات في ظروف صحراوية أو شبه

صحراوية لاختبار هذه التكنولوجيا. وقد تم بناء هذه الأنظمة أساساً لاختبار هذه التكنولوجيا باستخدام طريقتين مختلفتين؛ إما فكرة «برج الطاقة» الشمسي أو فكرة «الجرن الطويل المقوّس». تستخدم المنشأة الحرارية ذات برج الطاقة الشمسي عدداً كبيراً من المرايا أو وحدات الهيليوستات (Heliostats) ذات المقدرة على ملاحقة الشمس أوتوماتيكياً لكي تركّز الأشعة المنعكسة على مستقبِل موجود على قمة البرج المركزي. يُسخَّن المُستقبِل إلى درجة حرارة عالية جداً بواسطة الإشعاع الشمسي العالي التركيز الذي يستخدم في تسخين الماء لإنتاج البخار مباشرة، أو في بعض الحالات لتسخين ملح منصهر يمتلك سعة حرارية أكبر لنقل هذه الطاقة الحرارية بعيداً إلى ماءٍ في مرجل ثانوي. في كلتا الحالتين، يتم استخدام البخار المنتج في دورة رينكين التقليدية لإدارة مولّد مُدار بواسطة توربين بخاري. يبيّن الشكل (7-1) (وزارة الطاقة الأميركية - 2005) منشأة الطاقة الشمسية (Solar Two) التي تقع في صحراء ماجيف (Majave Desert) قرب مدينة بارستو (Barstow) في كاليفورنيا. تستخدم هذه المنشأة الملح المنصهر كمائع وسيط لنقل الطاقة الحرارية وهي نسخة معدلة عن المنشأة الشمسية الأصلية (Solar one) التي تسخّن الماء مباشرة في البرج لإنتاج البخار. شُغِّلت المنشأة الشمسية الأصلية (Solar One) بين عامي 1982 و1988، بقدرة عظمى 10 ميغا واط خلال أجواء صاحية مُشمسة. يزيد مائع نقل الطاقة الحرارية الملحي المنصهر المستخدم في المنشأة الشمسية (Solar Two)، المقدرة على تخزين الطاقة من أجل الاستعمال خلال الفترات الغائمة وفي الليل. وقد أثبت التشغيل الناجح لهذه المنشأة على مدى ثلاث سنوات من عام 1996 إلى عام 1999 الفائدة من ازدياد سعة تخزين الطاقة. وأدت هذه النتائج إلى خطة من أجل بناء منشأة مماثلة في إسبانيا، هي منشأة «الشمسية الثالثة» (Solar Tres)، حيث أن الإعانة المالية المعتبرة للطاقة المتجددة جعلت ذلك خياراً مناسباً من الناحية الاقتصادية. وقد صُمّمت هذه المنشأة التجارية

الأولى لتستقبل طاقة شمسية عظمى حوالى 40 ميغا واط، وسوف تستعمل تخزين الطاقة الحرارية بواسطة الملح المنصهر، وبذلك يمكن تشغيل توربين 15 ميغا واط لمدة 24 ساعة في اليوم خلال الصيف بمُعامل سعة(*) (استفادة) (Capacity Factor) سنوي يقترب من 65 في المئة.

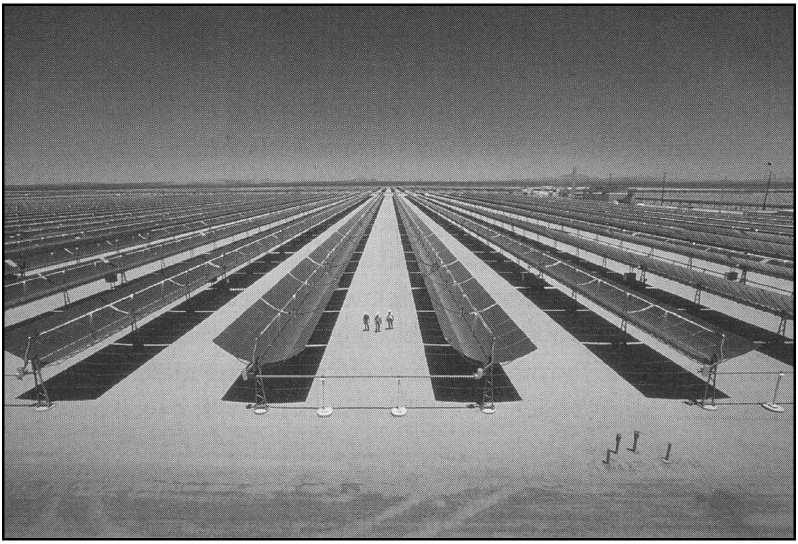


الشكل (7-1): منشأة الطاقة الشمسية التركيزية Solar two

المصدر : DOE.

هناك تكنولوجيا أحدث قيد التجريب الآن في الولايات المتحدة وهي فكرة الجرن الطويل المقوّس التي تستخدم مصفوفة من مرايا قطع مكافئ تقوم بتركيز أشعة الشمس على أنبوب مستقبل يمتد على طول كل مرآة عند النقطة المحرقية. لا تتطلب هذه الفكرة برجاً نظراً

(*) معامل السعة: هو نسبة الطاقة الخرج الفعلية خلال فترة من الزمن إلى طاقة الخرج عندما تعمل المحطة بقدرتها التقديرية خلال الفترة الزمنية نفسها.



الشكل (7-2): محطة وصلة كرامر الشمسية من نوع الجرن (Kramer Junction).

المصدر: DOE.

إلى أن الطاقة الحرارية تُجمَع باستمرار بواسطة المائع الزيتي الحار الناقل للحرارة الذي يُدفع في الأنابيب الممتدة على طول مصفوفة المرايا الخطية. يُستخدم مبادل حراري لنقل الطاقة الحرارية من الزيت الحار إلى الماء لدرجة الغليان، حيث إن البخار الناتج يستخدم ثانيةً لتوليد الكهرباء باستخدام دورة رينكين التقليدية. يتم صف جميع مرايا القطع المكافئ على طول محور شمال - جنوب، ويتم مَيلانها أوتوماتيكياً لتتبع الشمس التي تجتاز السماء من الشرق إلى الغرب. وبذلك يتم تركيز المرايا على الشمس من أجل زمن الذروة المُحتمل لرفع كمية الطاقة الشمسية الملتقطة إلى حدها الأعلى. هناك تسعة من هذه الأنظمة الشمسية المُولّدة للكهرباء (المعروفة بـ SEGS) تم بناؤها في صحراء ماجيف، تتراوح استطاعتها من 14 إلى 80 ميغا واط كحد أقصى. توفّر هذه الأنظمة مجتمعةً قدرة كهربائية عالية حوالى 350 ميغا واط، يتم إرسالها إلى شبكة كاليفورنيا العامة. ويستخدم

الغاز الطبيعي في هيئة «هجينة»، وبذلك يُمْكن توليد قدرة كهربائية ثابتة خلال الفترات الغائمة الممتدة أو عند الليل، لكن حتى الآن هناك حوالى 75 في المئة من إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة يتم إنتاجها من الطاقة الشمسية. تتميز هذه المحطات بكلفة إجمالية أقل من كلفة محطات الطاقة الشمسية ذات البرج، وقد بيّنت أنها تستطيع تزويد أرخص قدرة كهربائية مولّدة شمسياً، حوالى 0.12 دولار للكيلو واط ساعة. يُبيّن الشكل (7-2) مشهداً جزئياً لمحطة وصلة كرامر (Kramer Junction) الشمسية من نوع «الجرن» التي تُشغَّل في كاليفورنيا، حيث إنها تتألف من خمس محطات منفردة (SEGS 3 to 7) مُولّدةً قدرة إجمالية 150 ميغا واط (US DOE, 2005). يشير هذا الشكل إلى حجم الأجران التركيزية الشمسية المنفردة، وكما يبيِّن الأنبوب المستقبِل ممتداً على طول النقطة المحرقية لكل جرن مُجمِّع للطاقة الشمسية.

7. 2. 2. توليد الطاقة الكهربائية الشمسية الفولتضوئية

يتم تصنيع الخلايا الشمسية الفولتضوئية (PV) من مواد نصف ناقلة، خصوصاً تلك التي تستعمل طاقة الفوتونات من الإشعاع الشمسي الساقط على الخلية لتنتج تياراً كهربائياً. يؤدي التأثير الفولتضوئي إلى توليد إلكترونات منفصلة عن ذرات منفردة عندما تصطدم هذه الفوتونات بمواد الخلية، وسوف يُولّد جريان هذه الإلكترونات «الحرة» عبر المادة فرق جهد (فولتية) حوالى 0.5 فولت. بعد ذلك يستطيع فرق الجهد هذا توليد تيار كهربائي لتغذية حمل خارجي. ويعتبر السِّليكون المادة الأكثر شيوعاً المستخدمة في تصنيع الخلايا الشمسية الفولتضوئية، الذي تتم إشابته عادةً بالفوسفور أو بمادة مماثلة لضمان إطلاق إلكترونات حرة عندما تمتص المادة الفوتونات الساقطة. وتشمَل الخلايا أيضاً شبكة معدنية ناقلة ليتم بواسطتها التقاط أكبر عدد ممكن من الإلكترونات الحرة، حيث تُوجّه بعدئذٍ إلى الحمل الخارجي. تصنع الخلايا الشمسية الأكثر غلاءً من

رُقاقات السليكون البلَّوري التي تقطع من بلَّورة وحيدة تمت تنميتها بشكل خاص. وتمتلك هذه الرقاقات الكفاءة الأعلى لتحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء مقارنةً بأيّ خلايا شمسية أخرى، على الرغم من أن هذه الكفاءة لا تزال حوالى 15 في المئة فقط. يعود السبب في كفاءة التحويل المنخفضة إلى أن معظم طاقة الشمس محتواة في جزء الموجة الطويلة من الطيف الشمسي الذي لا يؤدي إلى فوتونات يمكن امتصاصها من قبل الخلية. يتم أيضاً استخدام السليكون متعدد البلَّورات، الأسهل للتصنيع وبالتالي أقل كلفة، على الرغم من أن كفاءة الخلايا الشمسية في تحويل الطاقة الناتجة هي أقل من تلك ذوات البلَّورة الوحيدة. أما الخلايا الشمسية المسماة خلايا السليكون اللابلَّورية (Amorphous Silicon) فيتم تصنيعها باستخدام تقنيات الأفلام الرقيقة (Thin-film)، لكن كفاءتها هو فقط حوالى نصف كفاءة الخلايا البلَّورية. هناك «كسب على حساب الآخر» واضح بين كلفة الإنتاج وكفاءة التحويل للإشعاع الشمسي إلى كهرباء، وهذا مجال نشط للتطوير.

تتألف اللوحة الفولتضوئية الشمسية من العديد من الخلايا الشمسية المنفردة المرتبطة مع بعضها بحيث يُمكن توليد تيار كهربائي كافٍ لتزويد قدرة إلى الحمل الخارجي. تعرَّف كفاءة هذه اللوحات، بقدرة الخرج الكهربائية مقسمةً على قدرة الإشعاع الشمسي (الدخل)، وتتراوح هذه الكفاءة بين 10 و15 في المئة لمعظم اللوحات (PV) التجارية ذات السليكون البلَّوري، وحوالى نصف هذه القيمة للوحات الأرخص ذات السليكون اللابلَّوري. يتم عادة ربط مجموعات من خلايا أحادية مع بعضها على التسلسل لتزيد من فرق الجهد، عادةً إلى ما بين 12 و24 فولت مستمر (DC)، وبعدئذٍ توصل هذه المجموعات على التوازي لتشكل اللوحة كاملةً. تبلغ مساحة لوحة شمسية نموذجية حوالى 0.8 متر × 1.5 متر، التي من السهل التعامل معها، وإذا صُنعت الخلايا من السليكون الكريستالي، سوف

تبلغ عادةً استطاعة الخرج العظمى لهذه اللوحة حوالى 150 واط في ضوء الشمس الناصع. يَستهلك البيت الأميركي النموذجي 5000 كيلو واط ساعة من الطاقة الكهربائية في العام، أو كمعدّل حوالى 15 كيلو واط ساعة في اليوم. في منطقة ذات متوسط إشعاع شمسي 5 كيلو واط ساعة للمتر المربع في اليوم، يشير ذلك إلى أن مساحة اللاقط الشمسي يجب أن تكون حوالى 30 متر مربع لكي توفر جميع المتطلبات الكهربائية، بافتراض متوسط كفاءة حوالى 10 في المئة. يمكن أن يكون للوحة فولتضوئية بمساحة 30 متراً مربعاً قدرة خرج كهربائية بذروة حوالى 3.5 كيلو واط، والتي من المفروض أن تلائم معظم الحمل الكهربائي للمنزل طالما هي في ضوء الشمس مباشرةً. هناك عادةً عدم توافق بين إمكانية التوليد العظمى وطلب الكهرباء المنزلي. مثلاً، إن توليد القدرة الكهربائية يصل إلى الذروة حوالى منتصف نهار صحو صيفي عندما يكون معظم القاطنين هم في العمل أو على الشاطئ. بالطبع، يمكن أن تظهر ذروة الطلب الكهربائية عند فترة الغروب في يوم نصف - شتائي مظلم حيث يتوافر القليل من الطاقة الشمسية أو عدم توافرها. في كل حالة، هناك حاجةً إلى بعض أنواع أنظمة التخزين الكهربائي بواسطة (المُدّخرات الكيميائية) البطاريات المتوافرة، وبذلك لا تضيع الطاقة المتولّدة خلال الذروة الشمسية، أو لضمان مصدر مناسب للكهرباء عند الليل في أشهر الشتاء، أو أن هناك حاجة إلى الوصول إلى نظام احتياطي كهربائي لضمان مصدر مناسب للطاقة الكهربائية خلال الليل أو خلال الفترات الغائمة التي يحصل خلالها طلب كبير، أو لتخزين الطاقة الإضافية التي يمكن أن تتولد خلال الصيف عندما يكون الطلب ضعيفاً.

إن المتطلبات لكلٍ من التخزين والاحتياط في الشبكة الكهربائية تضيف تعقيدات إضافيةً، وعادةً بكلفة كبيرة، إلى النظام الشمسي الفولتضوئي الكهربائي. كذلك، إن طبيعة للطاقة الشمسية المُتقطعة

تعني أن النظام الفولتضوئي قادر فقط على إنتاج مستويات الذروة من الكهرباء في فترة قصيرة نسبياً خلال سنة واحدة. يؤدي ذلك إلى «مُعامل سعة» (Capacity Factor)، أو بوصفٍ أفضل إلى معامل استفادة (Utilization Factor) منخفض، والذي يعرَّف بنسبة الطاقة السنوية المولّدة إلى الكمية التي يمكن توليدها إذا كان النظام يولّد عند ذروة الخرج 24 ساعة في اليوم لسنة كاملة. باستخدام هذا التعريف بالنسبة إلى محطات طاقة الوقود الأحفوري أو النووي التقليدية مثلاً، من الممكن أن يكون مُعامل السعة النموذجي حوالى 80-90 في المئة. بتعبير آخر، يتوقع من المنشأة أن تشتغل عند 100 في المئة ذروة خرج خلال 80-90 في المئة من الوقت، مع اعتبار الوقت المتبقي هو لأعمال الصيانة أو للانقطاع القسري للطاقة الكهربائية. بالنسبة إلى نظام شمسي فولتضوئي عند خطوط العرض الوسطى من الكرة الأرضية، يمكن أن يكون هذا المُعامل منخفضاً إلى حد 10 في المئة، أو حتى أقل في بعض المساحات بسبب التوفّر المحدود لمصدر الطاقة الشمسي الأولي على مدى السنة. لن تتوافر طاقة شمسية عند الليل، وخرج أقل من 100 في المئة خلال النهار عندما يكون النظام الفولتضوئي معتماً جزئياً بسبب الغيوم. مثلاً، في المملكة المتحدة حيث المناخ الغائم معظم أيام السنة، قُدِّر اتحاد توفير الطاقة الإنجليزي أن نظام فولتضوئي بقدرة 1 كيلو واط من المفروض أن يُولّد طاقة لا تقل عن 750 كيلو واط ساعة في السنة. ويتوافق ذلك مع مُعامل إنتاج 8.5 في المئة فقط، جاعلاً إيّاها أقل من موقع مثالي للإنتاج الشمسي الفولتضوئي. إن تضمين مثل هذا المُعامل المنخفض للإنتاج يعني أن التجهيزات الكبيرة تُستثمر بشكل ضعيف، وبالتالي تزداد بشكل كبير التكاليف الرئيسة بوحدة الخرج من الكهرباء. يرفع هذا المُعامل، بالترافق مع الكلفة الأولية العالية للوحات الفولتضوئية، سعر الوحدة (الكيلو واط ساعة) للكهرباء المُولّدة من اللوحات الشمسية

الفولتضوئية بشكل كبير مقارنةً بتكاليف التوليد التقليدي في معظم أنحاء العالم.

ليسَ من السهل الحصول على كلفة تفصيلية ومعلومات عن أداء لمنشآت نموذجية، لكن منزل لورد (Lord House)، الواقع في الولاية الأميركية الشرقية من مين (Maine) (Maine Solar House, 2005) حيثُ استخدم كحالة دراسية بواسطة الوكالة الدولية للطاقة، يمكن استخدامه كمُرشد جيد للدراسات المالية الحالية لتوليد الكهرباء الشمسية الفولتضوئية. تم تصميم هذا المنزل بكفاءة طاقة وطاقة مستدامة كنقطة أساسية، وهكذا فهو معزول بشكل جيد مع نوافذ صغيرة إلى حدٍّ ما وتمَ تموضعه بحيث إن اللوحات الشمسية على السطح مواجهة للجنوب بدون ظل. يحتوي السطح على كلٍ من اللواقط الحرارية الشمسية من أجل التدفئة، و384 قدم مربع (35.7 متر مربع) من اللوحات الشمسية الفولتضوئية. (جميع البيانات الواردة هنا تم الحصول عليها من موقع الإنترنت للوكالة الدولية للطاقة الخاص بالكهرباء الشمسية (IEA, 2005) أو من الموقع المُدار بواسطة المالك السيد وليام لورد). هناك عامل واحد يجعل هذه التجهيزات جذابة فعلاً، هو المحافظة على سياسة محصلة القياس للطاقة (بواسطة عدادات ثنائية الاتجاه) التي تمَ تبنّيها من قِبَل شركات الكهرباء المحلية عند الأخذ بالحسبان التزويد الاحتياطي للطاقة الكهربائية عن طريق ربط المنزل بالشبكة الكهربائية العامة. تُشير هذه السياسة إلى أن الطاقة الكهربائية الواردة من الشبكة إلى المنزل هي فقط التي سوف يستوفى سعرها، بينما أي طاقة كهربائية مضافة مزوّدة إلى الشبكة لن يتم دفع قيمتها. في هذه الحالة، بما أن النظام الشمسي الفولتضوئي زوّد 591 كيلو واط ساعة إلى الشبكة على مدى السنة الكاملة، لم يكن هناك أي مدفوعات لاستهلاك الطاقة الكهربائية المزوّدة من شركة الكهرباء، طالما تلقوا 591 كيلو واط ساعة مجاناً. وكان هناك رسوم شهرية صغيرة للربط بالشبكة

الكهربائية وهي حوالى 8 دولارات شهرياً للمُساعدة في دفع نفقات الخدمة.

إن البيانات الرئيسة المتعلقة بالمنزل عام 1998 كما وفّرها المالك مبيّنة في أعلى الجدول (7-1)، وتم استخدامها لتوليد «البيانات المُشتقة» المُبيّنة في أسفل الجدول. في الجزء الثاني من الجدول يمكن ملاحظة أن إجمالي «الكلفة المتفاداة» للكهرباء التي كان من الممكن شراؤها في حال عدم وجود النظام الشمسي هي حوالى 439 دولاراً معتمدةً على استهلاك 3655 كيلو واط ساعة خلال السنة وبسعر وحدة كهربائية 0.12 دولار للكيلو واط ساعة. إن كلفة النظام الإجمالية (30,000 دولار) كانت مقدرة بواسطة المؤلف مستخدماً كلفة لوحة شمسية فولتضوئية بـ 5 دولارات لكل واط ذروة الذي هو تقدير تقريبي لكلفة الوحدة حالياً. وتقدير تقريبي 1000 دولار لكل كيلو واط من أجل نظام القالبة (Inverter). والباقي 4800 دولار مفترضة لتجهيزات القياس والتحكم، بالإضافة إلى تركيب النظام. إن الرسالة البسيطة من الجدول (7-1) هي أنه في الحقيقة تم استثمار 30,000 دولار كلفة مجمل النظام بمعدّل فائدة 5 في المئة، وعائد الاستثمار من المفروض أن يكون أكثر من ثلاث مرات الكلفة المُتفاداة للكهرباء المزوّدة بالنظام. حتى مع معدّل فائدة عند 3 في المئة سوف يكون دخل الاستثمار أكثر من ضعف الكهرباء المتفاداة. وهكذا ضمن الظروف الاقتصادية الحالية، ومع افتراضات تكلفة نظام ومعدلات أسعار الكهرباء المنزلية المبيّنة في الجدول (7-1)، من الواضح أن النظام الشمسي الفولتضوئي ليس جذاباً اقتصادياً في الوقت الحالي. ولا يأخذ هذا الأمر بالحسبان فائدة توليد الكهرباء من دون انبعاثات غازات الدفيئة، أو أي تغيرات في المستقبل التي يمكن أن تتراكم نتيجة الكلفة المتناقصة للأنظمة الشمسية الفولتضوئية وأي زيادات يمكن أن تظهر على كلفة الكهرباء المنزلية.

الجدول (7-1) بيانات منزل لورد الشمسي - 1998

بيانات الدخل	
القدرة الكهربائية العظمى	4.2 كيلو واط
مساحة اللوحات الشمسية الفولتضوئية	35.7 متر مربع
الطاقة الكهربائية الفولتضوئية المُولّدة	4246 كيلو واط ساعة
الطاقة الكهربائية المُعطاة إلى الشبكة	3008 كيلو واط ساعة
الطاقة الكهربائية المأخوذة من الشبكة	2417 كيلو واط ساعة
محصلة الطاقة المعطاة إلى الشبكة	591 كيلو واط ساعة
سعر وحدة كهرباء الشبكة	0.12 دولار للكيلو واط ساعة
البيانات المشتقة	
استهلاك الكهرباء السنوي	3655 كيلو واط ساعة
معامل السعة (الاستفادة)	11.5 في المئة
سعر الوحدة للوحات الفولتضوئية (مُقدرة)	5 دولارات لكل واط استطاعه
إجمالي كلفة اللوحات الفولتضوئية (مُقدرة)	21000 دولار
كلفة التركيب والتحكم (مُقدرة)	4800 دولار
كلفة نظام القالبة (مُقدرة)	4200 دولار
إجمالي كلفة النظام (مُقدرة)	30000 دولار
الكلفة المُتفاداة للكهرباء	439 دولار
مُعدل الفائدة	5 في المئة
عائد على كلفة النظام إذا استُثمر	1500 دولار

إن النظام الذي تم وصفه للتو باستخدام الكهرباء المُولّدة بواسطة اللوحات الشمسية الفولتضوئية لتوفير احتياجات المنزل الواحد هو مثال واحد لنظام «الطاقة المُوزعة» الذي يتم فيه تلبية طلبات الكهرباء لِمستخدمين صغار كثر، على الأقل جزئياً، في مكان الاستهلاك على خلاف كون الكهرباء مؤَمَّنة من نظام الشركة الكبير. يمكن أن تكون هذه الأنظمة جذابة وبخاصة عندما يكون مصدر الطاقة الأوّلي، في هذه الحالة الطاقة الشمسية، مُنتشراً جداً في الطبيعة مع كثافة طاقة منخفضة. لقد أزاح التبنّي الواسع لأنظمة الطاقة الموزعة العبء المتعلق بتأمين موارد رأس المال المطلوبة لمعدّات التوليد من شركات الخدمة الكبيرة إلى الأفراد، أو للأعمال الصغيرة، لكنه حرّرهم بعد ذلك من دفع مدفوعات طاقة منتظمة. ويمكن أن يكون نوع التمويل بالنسبة إلى هذه الأنظمة عاملاً مهماً في تحديد معدل تبني هذه المشاريع. كما رأينا من مثال «منزل لورد»، أنه بالنسبة إلى معظم الأفراد لن يكون تمويل التجهيزات الفولتضوئية الشمسية المنزلية طرحاً جذاباً اقتصادياً مقارنةً بالتكاليف الحالية والمعدات الكهربائية في معظم البلاد الصناعية. إن معظم التجهيزات الخاصة في العالم المتطور مموّلة حالياً بواسطة «المطوّرين الأوائل» الذين يهتمون بتوضيح المحاسن البيئية للطاقة المتجددة، بغض النظر عن توفير المال. ولكي يتغير هذا الميزان يجب أن يكون هناك انخفاض مهم في تكاليف اللوحات الفولتضوئية الشمسية وتكاليف القالبة و/أو زيادة كبيرة في تكاليف شركات الكهرباء بسبب المتطلبات للتخلص أو على الأقل تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة.

يمكن أيضاً استخدام مصادر الطاقة الأولية «بكثافة طاقة» منخفضة من أجل نظام توليد أكثر مركزية إذا بدا ذلك طريقة مناسبة أكثر لتمويل مشاريع تطوير متجددة كبيرة. يُبيّن الشكل (7-3) أكبر محطة فولتضوئية شمسية مركزية في العالم وهي «محطة توليد



الشكل (7-3): محطة توليد سبرنغرفل الشمسية الفولتضوئية، الولايات المتحدة الأميركية

المصدر: Tucson Electric Power.

سبرنغرفل» (Tucson Electric Power, 2005) في الولايات المتحدة الأميركية. تقع هذه المُنشأة في صحراء أريزونا، أحد المواقع المشمسة جداً في الولايات المتحدة، وهذه المحطة ذات قدرة توليد عُظمى 4.6 ميغا واط كهربائي. تشمل المحطة حوالى 35,000 وحدة من اللوحات الشمسية بمساحة تغطيه إجمالية 44 فداناً (الفدان = 4000 متر مربع)، أو 17.8 هكتار، حيث تم تثبيت اللوحات بزاوية ميل 34 درجة مواجهة للجنوب. على الرغم من أنه يوجد بيانات تشغيل محدودة متوافرة بالنسبة إلى المحطة في هذا الوقت، فإن إنتاج الطاقة الكهربائية السنوي في عام 2004 كان 7064000 كيلو واط ساعة، الذي يتوافق مع مُعامل إنتاج 17.5 في المئة. وهذا أفضل بكثير من المقدار 11.5 في المئة المحقق لدى منزل لورد في «مين»، أو الحد الأدنى المُقدّر بـ 8.5 في المئة في المملكة المتحدة، كما يوضح الفائدة من تجريب مثل هذه المحطة في منطقة مشمسة عند خطوط عرض أقل. عند تقدير طرق متنوعة لتوليد الكهرباء بانبعاثات معدومة لغازات الدفيئة، سوف تقارن

شركات الكهرباء كلفة استخدام تجهيزات شمسية فولتضوئية كبيرة بكلفة التوليد من مصادر أخرى كالطاقة النووية، أو بالطبع التوليد باستخدام الوقود الأحفوري مع حجز وتخزين غاز CO_2. سوف يكون هناك اعتباران مهمان وهما كلفة رأس المال لتجهيزات التوليد، بالدولار لكل كيلو واط قدرة مركّبة، ومُعامل السعة. بأخذهما معاً، سوف يحدد هذان المُعاملان إلى حد بعيد الكلفة السنوية، بالدولار لكل كيلو واط ساعة، للكهرباء المُولّدة. في هذا الوقت إن كلفة رأس المال للتوليد الشمسي الفولتضوئي، عند حوالى 5000 دولار لكل كيلو واط قدرة مركّبة عُظمى هي حوالى مرتين ونصف من الكلفة في حالة منشأة طاقة نووية، التي هي حوالي 2000 دولار لكل كيلو واط قدرة مركّبة (انظر الفصل الثامن). غير أنه من المتوقع أن يكون مُعامل الإنتاج حوالى 85 في المئة بالنسبة إلى المنشأة النووية، بينما هو فقط حوالى 18 في المئة كما رأينا أعلاه بالنسبة إلى محطة سبرنغرفل الشمسية الفولتضوئية. بالطبع من المفترض الأخذ بعين الاعتبار كلفة تزويد المحطة النووية بالوقود في أي مقارنة اقتصادية مناسبة، بينما كلفة الوقود الأساسية بالنسبة إلى المنشأة الشمسية الفولتضوئية هي لا شيء، لكنها كلفة صغيرة نسبياً بالنسبة إلى المحطة النووية. إن جمع كل من كلفة الإنشاء الأعلى وفق قدرة خرج عُظمى، ومُعامل السعة المنخفض جداً بالنسبة إلى المنشأة الشمسية الفولتضوئية، يجعل الكلفة السنوية للطاقة الكهربائية المولّدة أعلى بكثير مما هي بالنسبة إلى المنشأة النووية. إن مُعامل السعة المنخفض المترافق مع الحاجة إلى مصدر طاقة احتياطي أو تخزين كبير للطاقة، سوف يكون أحد التحديات الرئيسة المترافقة مع كل أشكال أنظمة الطاقة المتقطعة، بما فيها الأنظمة الشمسية الفولتضوئية المركزية والموزعة، بالإضافة إلى نظم طاقة الرياح.

هناك تحدٍ رئيس للتبني الواسع لمَصادر الطاقة المتجددة

المتقطعة (وبالأخص النظم الشمسية الفولتضوئية التي لا تنتج كهرباء خلال الليل) بسبب الحاجة إلى سعة تخزين كبيرة للطاقة مع هذه النظم، أو إلى شبكة كهربائية كبيرة قادرة على تأمين مصدر احتياطي للطاقة. إذا أصبح النظام الشمسي الفولتضوئي أكثر جاذبيةً اقتصادياً على المدى الطويل، وبذلك منتشراً أكثر، يمكن أن توجد ضغوطات إضافية على الشركات الكهربائية لكي تؤمن مدخلاً إلى الشبكة كمصدر احتياطي. سوف يكون ذلك صحيحاً بالنسبة إلى نظم الطاقة الموزعة، كما هي الحال بالنسبة إلى المحطات المركزية الأكبر، كالمحطة التجريبية في توكسون - أريزونا. من المحتمل أنَ الضريبة الشهرية الثابتة الصغيرة على الربط مع الشبكة المُستخدمة في حالة الدراسة السكنية في منطقة «مين» التي سبق مناقشتها، لا تبيّن التكاليف الحقيقية لتأمين الطاقة الاحتياطية عندما يتطلب الأمر ذلك. عندما يزداد الطلب على توفير مستويات كبيرة من الطاقة الاحتياطية، بالترافق مع عائدات صغيرة لمبيعات الكهرباء، يمكن لشركات الكهرباء أن تُضيق ضرائب ربط أعلى، ما قد يؤثّر عكسياً في الجوانب المالية للأنظمة الشمسية الفولتضوئية. وهكذا، من المحتمل أن يوجد حدّ لإجمالي كمية الطاقة المتجددة المتقطعة والمولّدة التي يمكن «امتصاصها» بشكل اقتصادي من قبل نظام شركة الكهرباء. سوف تختلف هذه الكمية المُحددة من استطاعة التوليد العُظمى من شركة إلى شركة، ويعتمد ذلك على مخطط الطلب (Demand Profile) الخاص بشركة الكهرباء، وفيما إذا كان لدى هذا المخطط مستويات كبيرة من تخزين الطاقة أم لا، كتلك المزوِّدة بحصة كبيرة من القدرة العظمى للمنشآت الكهرومائية.

7. 3. طاقة الرياح

لاحظنا أنه لدى طاقة الرياح أيضاً كثافة طاقة مُنخفضة وثرواتها الكامنة موزعة بشكل غير متساوٍ. لقد استُخدمت طاقة الرياح منذ

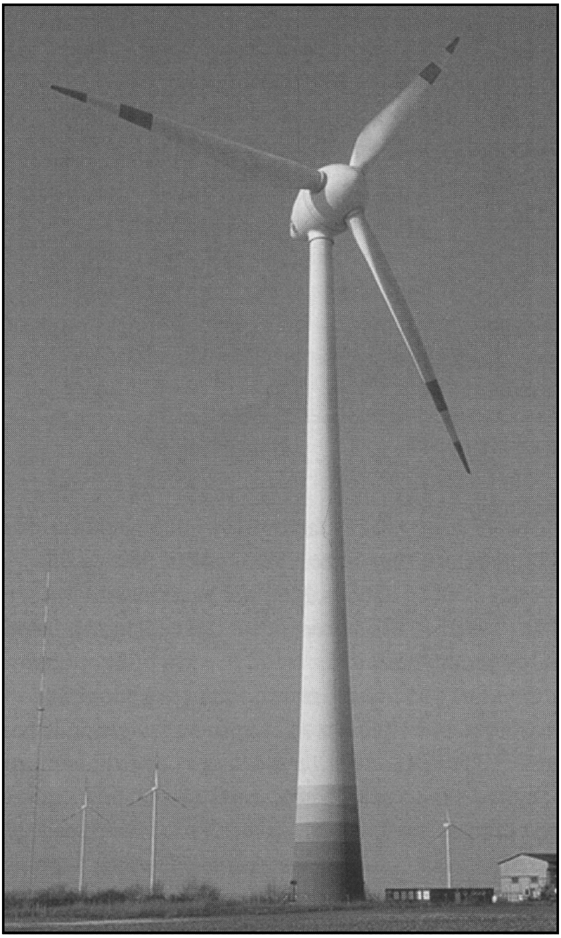
قرون عدة، مبدئياً على شكل طواحين هوائية لتأمين القدرة من أجل طحن الحبوب، ولسحب الماء من الأرض المنخفضة في هولندا وأجزاء من إنجلترا. في بداية القرن العشرين قبل أن تؤدي إنارة الريف إلى توافر الكهرباء المولّدة عن طريق شركات الكهرباء، استخدمت مزارع كثيرة في أميركا الشمالية طواحين هوائية صغيرة لتوليد الكهرباء محلياً. غير أن كل هذه الطواحين اختفت عندما أصبحت الكهرباء الرخيصة من محطات الطاقة الكبيرة متوافرة بشكل كبير حوالى منتصف القرن السابق. وعند دخولنا القرن الحادي والعشرين، رَجعت طاقة الرياح إلى الظهور، وهي حالياً المصدر الأكثر أهمية للكهرباء المُولّدة من مصادر متجددة (غير الطاقة المائية). وإن طواحين الهواء الجديدة (أو التوربينات الرياحية كما يفضّل المصنعون تسميتها) هي أكبر بكثير مما كانت عليه في الماضي، وهي الآن متوافرة بأحجام حتى 4.5 ميغا واط كهربائي كقدرة عظمى، وبوحدات حتى 5 ميغا واط هي الآن في مرحلة التطوير. ما زال هناك في أوروبا بشكل خاص، تبنٍ واسعٌ لطاقة الرياح كمصدر للكهرباء بالنسبة إلى شركات الكهرباء الرئيسة، حيث كانت ألمانيا والدنمارك سبّاقتين في استخدام طاقة الرياح. تمتلك ألمانيا السعة الاستطاعية الأكبر في العالم لنظم طاقة الرياح المركّبة، بينما تنتج الدنمارك 20 في المئة تقريباً من إجمالي طاقتها الكهربائية من طاقة الرياح. ولا يزال هناك نمو هائل في مقدار القدرة العُظمى لنظم طاقة الرياح في السنوات الأخيرة، بالأخص في أوروبا، كما يمكن أن يُستنتج من الجدول (7-2) (جمعية طاقة الرياح الأوروبية - 2005). إلا أن كمية الطاقة المساهمة من هذا المصدر ما زالت تشكل جزءاً صغيراً جداً فقط من مجمل الطلب على الطاقة الكهربائية، بسبب مُعامل السعة المنخفض لطاقة الرياح. في عام 2003، مثلاً، كان إجمالي الطاقة المولّدة من الرياح 0.5 في المئة فقط من إنتاج الطاقة الكهربائية العالمي.

الجدول (7-2):
القدرة العُظمى لنظم طاقة الرياح المركبة عالمياً (MWe):

البلد	2001	2003
ألمانيا	8734	14612
الولايات المتحدة	4245	6361
إسبانيا	3550	6420
الدنمارك	2465	3076
الهند	1456	2125
إيطاليا	700	922
المملكة المتحدة	525	759
هولندا	523	938
الصين	406	571
اليابان	357	761
باقي دول العالم	1975	3756
المجموع الكلي	**24927**	**40301**

المصدر: European Wind Energy Association.

تستفيد التوربينات الرياحية الكبيرة، التي تركّب حالياً، من المواد الخفيفة الحديثة لتخفيض أوزانها وكلفتها، وكذلك تستفيد أيضاً من المولّدات الحديثة وتصميم نظم التحكم لتحسين أدائها. تستفيد هذه التوربينات عادةً من التحكم بزاوية أجنحة الدّوار (المروحة) للتوربين، بالإضافة إلى تصاميم لمولّد متغيّر السرعة ومن دون علبة سرعة (تروس) للتكيّف مع سرعات الرياح المتغيرة. يبيّن الشكل



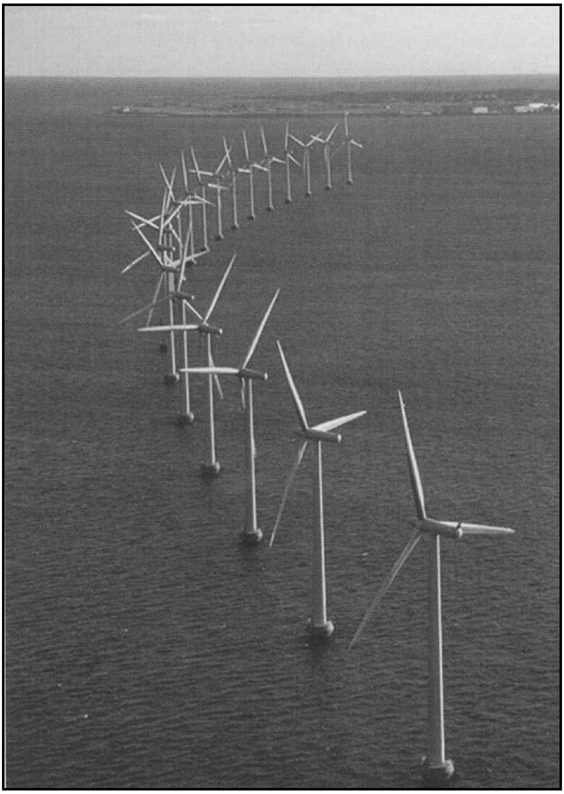
الشكل (7-4): توربين رياحي كبير 4.5 ميغا واط.

المصدر: Enercon .

(4-7) (Enercon, 2005)، صورة لأحد أكبر التوربينات الرياحية المتوافرة حالياً، (موديل E112 من Enercon) الذي تم تركيبه قرب ماغديبرغ في ألمانيا، بقدرة عُظمى 4.5 ميغا واط. لدى هذه الوحدة الكبيرة جداً يساوي قطر الدوار 114 متراً، ما يعطي مساحة مسح للدوار تساوي 10207 أمتار مربعة، وبارتفاع لمركز الدوار حوالى

124 متراً عن سطح الأرض. إن وجود مثل هذا الارتفاع لمركز الدّوار يقدّم حسنة مهمة وهي أن الدوّار موضوع في الحد الأعلى من «طبقة الهواء الحدّية» (Boundary Layer) الأرضية حيث يكون متوسط سرعة الرياح أعلى بكثير. يُبنى الدوّار من مواد الألياف الزجاجية المقوّاة بصمغ الإيبوكسي الخفيفة الوزن، ويدور بسرعة متغيرة بين 8 و13 دورة في الدقيقة. ويصمم التوربين ليعمل بسرعة رياح دنيا 2.5 متر في الثانية، وسرعة «توقف» عند حوالى 30 متراً في الثانية لحماية التوربين والمولّد من الضرر.

على الرغم من أنه تم تركيب توربينات رياحية كثيرة كدفعة تركيبات واحدة لتوضح بشكل رئيس، التكنولوجيا، فإن التوجه الآن هو لبناء «مزارع رياحية» بتوربينات رياحية واقعة في منطقة ذات متوسط سرعة رياح عالٍ. هذه المزارع الرياحية يمكن أن تكون محدّدة على الأرض، عادةً في مناطق نائية حيث يوجد تداخل قليل مع النشاطات البشرية، لكن بشكل متزايد يتم بناء مزارع رياحية في المياه على بعد من الشاطئ (Off-Shore) في قواعد البحر الضحلة من المناطق الساحلية. هناك تحديات تشييد إضافية مع هذه المناطق، بالطبع، حيث يجب بناء الأساسات تحت الماء والأبراج بحيث تستطيع تحمّل تلاطم الأمواج الشديدة، بالإضافة إلى سرعات الرياح العالية. وهناك فوائد كبيرة لكون سرعات الرياح أعلى بكثير عادةً في المناطق الساحلية حيث المياه المكشوفة تسمح للرياح بالتكوّن مع قليل من التداخل المحيطي. كذلك استفادت تقنيات التشييد والتصميم في مياه الشواطئ من الخبرة الكبيرة المكتسبة على مدى عقود عديدة من جرّاء بناء معدات استخراج النفط والغاز في المياه بعيداً عن شاطئ البحر. هناك فائدة أخرى من مواقع مياه الشواطئ وهي أن التوربينات تقع عادةً بعيداً كثيراً عن النشاطات البشرية المهمة، وهكذا تميل لتكون مقبولة أكثر للسكان المحليين. يبيّن الشكل (7-5) (مزرعة ميدلغرندن الرياحية - 2005) وهي صورة لأحد أكبر المزارع الرياحية



الشكل (7- 5): المزرعة الرياحية البحرية في ميدلغرندن، الدنمارك

المصدر: مزرعة ريح ميدلغرندن.

البحرية التي تم بناؤها حتى الآن في ميدلغرندن قرب كوبنهاغن في الدنمارك. تتألف هذه المنشأة المثيرة في قطاع أوريسوند، التي تفصل الدنمارك عن السويد من 20 توربيناً، تؤمّن قدرة إجمالية تساوي 40 ميغا واط، وتؤمّن حوالى 4 في المئة من استهلاك الطاقة الكهربائية السنوي لكوبنهاغن.

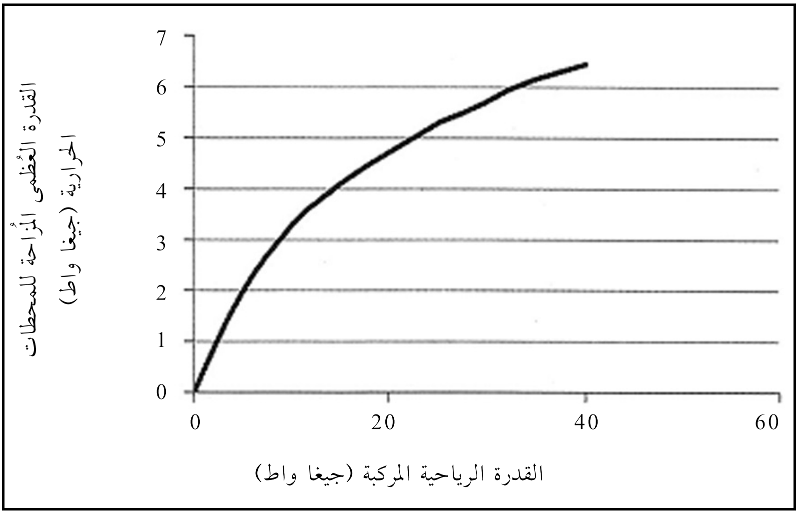
باعتبار أن مساهمة طاقة الرياح، كالطاقة الشمسية أو أي مصدر طاقة آخر متقطع، يَحتاج المرء إلى أن يكون حريصاً على عدم الخلط

بين القدرة العُظمى للتوربين الرياحي وكمية الطاقة المولّدة. تمثل القدرة العُظمى للتوربين الرياحي القدرة التقديرية (بالميغا واط) التي يمكن توليدها بواسطة التوربين عند سرعة الرياح الاسمية المصمّم عندها. بسبب الطبيعة المتقطعة لطاقة الرياح فإن سرعات الرياح عند، أو فوق سرعة الريح التصميمية، تظهر فقط في جزء من السنة. تقدّر الطبيعة المتقطعة لمساهمة الطاقة الرياحية لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة «مُعامل السعة» للتوربين. حيث يمثل مُعامل السعة نسبة جزء الطاقة المولّدة فعلياً (بالميغا واط ساعة) بواسطة التوربين الرياحي على مدى فترة معينة (عادةً سنة واحدة) إلى الطاقة العظمى التي يمكن توليدها نظرياً إذا جَرَت الرياح عند السرعة التصميمية، أو أعلى على مدى هذه الفترة. يتراوح عادةً هذا المُعامل بين 20 و30 في المئة بالنسبة إلى التوربينات الفردية، على الرغم من أنها تعتمد طبيعياً على الموقع المحدد. بالنسبة إلى عام 2003 قدّرت وكالة الطاقة الدولية (2005) أن الإنتاج الإجمالي العالمي لطاقة الرياح وصل إلى 84.7 تيرا واط ساعة، أو 0.51 في المئة من 16666 تيرا واط ساعة من الكهرباء المُولّدة من جميع المصادر. باستخدام إجمالي قدرة الرياح المركّبة، 40301 ميغا واط في عام 2003 المبيّنة في الجدول (7-2)، كان إجمالي مُعامل السعة العالمي للتوربينات الرياحية في عام 2003، 24 في المئة. وبالمقارنة، فإن منشأة طاقة كبيرة تعمل بالوقود الأحفوري، أو محطة طاقة نووية، سوف تمتلك بشكل طبيعي مُعامل سعة يتراوح بين 80 و90 في المئة، ما يدل على استفادة أفضل للمنشأة على أساس سنوي. إن مُعامل السعة المنخفض للتوربينات الرياحية يبيّن أيضاً الحاجة إلى الاختيار بِحرص لموقع المزرعة الرياحية يضمن أنها في منطقة يكون فيها جزء كبير من أيام السنة ذو رياح عالية.

تستلزم الطبيعة المتقطعة لطاقة الرياح أيضاً وجود احتياطي كبير لقدرة احتياطية أو تخزين متوافر للطاقة ليضمن مصادر كهربائية موثوقة

خلال فترات النشاط الرياحي المنخفض. لن تكون هذه عادةً مشكلة رئيسة عندما تشكل القدرة العُظمى لنظم طاقة الرياح نسبة صغيرة من القدرة العُظمى لإجمالي النظام، حيث توجد عادةً قدرة عظمى زائدة وكافية لتضمن أن إجمالي الطلب على القدرة يمكن تلبيته. لكي نستبدل القدرة العُظمى المستقرة لمحطات الوقود الأحفوري والوقود النووي بالتوربينات الرياحية، تحتاج القدرة العُظمى المركّبة إلى أن تكون أكبر بكثير من تلك التي تعود إلى محطات أخرى يُراد استبدالها بهذه التوربينات. بالطبع إن إحدى المسائل مع مصادر الطاقة المتقطعة هوَ القلق من إمكانية عدم وجود قدرة متوافرة خلال فترات الطلب العالية بسبب غياب الرياح مثلاً. إن مناصري طاقة الرياح يحاولون برهنة أنه طالما أن منظومات طاقة الرياح المُركّبة متوزعة جغرافياً، من المفروض أن يوجد دائماً، على الأقل، بعض الإسهامات متوافرة من التوربينات الرياحية. وقد بيّنت الدراسات أن القدرة العُظمى الرياحية المطلوبة لتحل محل القدرة العُظمى لمحطة حرارية، من المفروض أن تتناسب مع الجذر التربيعي للقدرة العُظمى لهذه المحطة، كما هو مبيّن في الشكل (7-6) . (Grubb, 1986) مثلاً، سوف يكون مطلوباً حوالى 9 جيغا واط تقريباً قدرة عُظمى لنظام رياحي لتحل محل 3 جيغا واط قدرة عُظمى لمحطات الوقود الأحفوري أو النووي. وعلى الرغم من أن الدنمارك قد حققت دخول 20 في المئة من طاقة الرياح إلى شبكتها الكهربائية، فإن هذا الأمر لم يكن ممكناً بدون الربط الكهربائي بدول الجوار: النرويج والسويد وألمانيا، حيث يمكن الاعتماد على هذه الدول للتزوّد بالقدرة الاحتياطية عندما تكون سرعة الرياح منخفضة.

إن التوسع الحديث السريع في طاقة الرياح عالمياً هو يعود جزئياً إلى التطورات الفنية في تصميم وبناء توربينات كبيرة متعددة الميغا واط، التي أدت إلى تخفيض كلفة الوحدة (الكيلو واط ساعة) للكهرباء المولّدة رياحياً. يتم تعزيز هذا التخفيض للكلفة عندما تُجمع



الشكل (7-6): إزاحة القدرة العُظمى للمحطات الحرارية بزيادة دخول القدرة الرياحية.

المصدر: M. J. Grubb, "The Integration and Analysis if Intermittent Sources on Electicity supply Systems," (Ph.D. Thesis, Cambridge University, 1986).

هذه التوربينات مع بعضها البعض في مزارع رياحية، التي لديها تأثيرات إضافية، بسبب اقتصاد الحجم، في تخفيض تكاليف الكهرباء. وتم حدوث هذا التوسع أيضاً في القدرة العظمى لطاقة الرياح كنتيجة للكلفة المتزايدة للوقود الأحفوري، بالأخص الغاز الطبيعي الذي يُستخدم تقليدياً لتوليد الكهرباء، بالإضافة إلى التأثيرات البيئية المترافقة مع حرق هذا الوقود. إن كلفة الإنشاء الحالية لبناء مزرعة رياحية كبيرة تتراوح تقريباً بين 1000 - 2000 دولار تقريباً لكل كيلو واط مركّب، الذي يعادل تكاليف (بالكيلو واط المركّب) محطة كهربائية تعمل على الفحم الحجري. هذه التكاليف لا يمكن أن تستخدم مباشرة لمقارنة كلفة إنتاج الطاقة، حيث إن مُعامل السعة المنخفض كثيراً في حالة التوربينات الرياحية يعني أن تكاليف الإنشاء لها تأثير أكبر بكثير في سعر وحدة الكهرباء النهائية. وإن كلفة الإنشاء المنخفضة بالكيلو واط ساعة المُولّدة بواسطة محطة وقود أحفوري

هي فقط أحد العناصر المؤثرة في كلفة الوحدة الكهربائية، مع كون كلفة الوقود هي العامل الرئيس. وقدّرت كلفة الوحدة الحالية للكهرباء المولّدة رياحياً على أنها تتراوح بين 5 سنتات أميركية و12 سنتاً بالكيلو واط ساعة، لكنها تعتمد على المكان المحدّد المختار. أيضاً تم تشجيع استثمار طاقة الرياح في مناطق عديدة بواسطة دعم حكومي مباشر أو غير مباشر. ففي الولايات المتحدة مثلاً، يمكن الحصول على مساعدة ضريبية فيدرالية تساوي 1.5 سنتات أميركية لكل كيلو واط ساعة من إنتاج الكهرباء المُولّدة رياحياً خلال أول عشر سنوات. عند تقديرات كلفة الوحدة الدنيا تكون طاقة الرياح الآن منافسة لمعظم الطاقة المُولّدة بالوقود الأحفوري، وهذا يعتبر صحيحاً، بالأخص مع الارتفاع السريع مؤخراً في سعر الغاز الطبيعي. من المحتمل أن يتم تخفيض هذه الأسعار أكثر خلال العقد القادم، وسوف تصبح طاقة الرياح عنصراً مهماً في التوليد المتنوع لدى العديد من الشركات الكهربائية.

7. 4. طاقة الكتلة الحيوية

كانت طاقة الكتلة الحيوية أول شكل من أشكال الطاقة التي استخدمت من قبل الإنسان، ويبقى إحراق الخشب المُجمّع يدوياً مصدراً مهماً للحرارة من أجل الطبخ والتدفئة في كثير من الأجزاء التي في طور النموّ من العالم. حتى في أكثر الدول صناعيةً، بالأخص في المناطق النائية منها، تستخدم عادةً مدافئ حرق الأخشاب والمواقد لتقدِّم على الأقل بعض عناصر متطلبات تدفئة العائلة في الشتاء. وإن استخدام طاقة الكتلة الحيوية قد نما الآن كثيراً بعيداً عن بداياته المتواضعة كوقود منزلي، وهو يستخدم بأشكال متعددة مختلفة في مجال واسع من الصناعات. تتضمن هذه مثلاً حرق مخلّفات الأخشاب لتوليد بخار في مصانع الورق، واستخدام «غاز مكب النفايات» (Landfill-gas) من نفايات بلدية صلبة (Municipal Sold Waste - MSW) من أجل توليد الطاقة الكهربائية، وإنتاج وقود

«الديزل الحيوي» والإيثانول من الذُرَة ومحاصيل الحبوب. إن الاحتراق المباشر للخشب، وأنواع أخرى من الوقود الحيوي، كالنفايات الصلبة والنفايات الزراعية، ما زالت تشكّل حتى الآن المكوّن الأكبر للاستخدام الحالي للطاقة الحيوية. لقد رأينا مسبقاً في الشكل (5-1) أن الوقود الحيوي، على شكل «نفايات متجددة قابلة للاحتراق»، أو (CRW)، تمثّل أعلى بقليل من 10 في المئة من إنتاج إجمالي الطاقة العالمي في عام 2002. وفي البلدان المتخلفة، تشكل «الطاقة الحيوية المشتقة» عادةً جزءاً أكبر بكثير من إجمالي الطاقة المستخدمة، وحتى يمكن أن تكون مصدر الطاقة المسيطر في بعض البلدان الأكثر فقراً.

أشارت دراسات كثيرة إلى أن الطاقة المعتمدة على الكتلة الحيوية سوف توفِّر مساهمة أكبر لإجمالي مخزون الطاقة، حيث إن سعر الوقود الأحفوري التقليدي يتزايد على مدى العقود القادمة. ويشير أيضاً مناصري الطاقة الحيوية إلى أن استخدام الكتلة الحيوية كمصدر للطاقة هو جذّاب جداً لأنه يمكن أن يكون مصدراً للطاقة «من دون ناتج صافٍ من غاز CO_2»، وهكذا لا يسهم في إنتاج غاز الدفيئة. إن احتراق طاقة الكتلة الحيوية يؤدي إلى إنتاج غاز CO_2، حيث إن معظم الكربون في الوقود يتحوّل إلى غاز CO_2 كما هو الحال خلال استهلاك الوقود الأحفوري. وهنا تعتمد العبارة «من دون ناتج صافٍ من غاز CO_2» على افتراض أن هناك أشجاراً جديدة أو محاصيل زراعية أخرى، سوف يُعاد زرعها إلى درجة أنها سوف تمتص أي غاز CO_2 مُنبعث خلال استهلاك الطاقة الحيوية. وقد يكون الأمر صحيحاً بالنسبة إلى «مزارع الطاقة» المُدارة كما يجب، لكن من غير المحتمل أن يتعلق الأمر بالبلدان التي في طور النمو حيث إن معظم الطاقة الحيوية يتم الحصول عليها من الغابات التي لا يعاد زرعها، على الأقل ليس بالدرجة نفسها التي حُصِدت بها. كذلك، إن انتشار استخدام الطاقة الحيوية يمكن أن يؤدي إلى اهتمامات كبيرة

حول توافر الأرض التي يمكن بطريقة أخرى أن تستخدم من أجل إنتاج الغذاء، أو لاستخدامات تجارية أخرى كإنتاج المواد الخشبية. بَيَّنت مراجعة حديثة لسبعة عشر دراسة للطاقة الحيوية مجالاً واسعاً من التقديرات لمستقبل الثروة الكامنة للطاقة الحيوية، تتراوح بين المستوى الحالي حوالى 42 إكساجول (10^{18} جول) (أو واحد جيغاطن نفط مكافىء)، و350 إكساجول، القريب من المُستوى الحالي لإجمالي إنتاج الطاقة، عند عام 2100 (Berndes et al. 2003). ويعود المَجال الواسع للتقديرات بحَدٍ كبير، إلى الافتراضات المختلفة جداً المَعمولة من أجل كلٍ من توفر الأرض وغلة المحصول.

إن احتراق نفايات الأخشاب، بما فيها نشارة الخشب وقشر الشجر، وبقايا أخرى، هي تكنولوجيا معروفة ومستخدمة بشكل واسع لتوليد الحرارة والكهرباء في صناعات معالجة الأخشاب. تطبق هذه التكنولوجيا عادةً في محطات لتوليد شكلين من الطاقة في الوقت نفسه (Cogeneration) في معامل الورق التي يستخدم فيها أولاً البخار لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام توربين بخاري، ويستعمل بعدئذٍ بخار العادم لتوفير حرارة من أجل العملية الصناعية. كذلك إن «المَحلول الأسود» (Black Liquor) من مصانع الورق السميك البني، الذي يتألف من مادة اللغنين(*) (Lignin) المنزوعة من رقاقات الخشب خلال عملية السحق بالترافق مع المواد الكيميائية المستهلكة، يُحرق غالباً لتوليد لكل من الكهرباء وحرارة المُعالجة. إن «مراجل الاستعادة» الخاصة، مُسمّاة بهذا الاسم لأنها تُستَخْدَم أيضاً لاسترجاع بعض الكيماويات المحتواة في المحلول الأسود من أجل إعادة استعمالها في المعالجة. اقترح بعض الباحثين توسيع استعمال الخشب لإنتاج الحرارة والكهرباء باستخدام خشب صلب من مزارع الأشجار سريعة النمو،

(*) مادة اللغنين هي مادة بوليميرية معقدة في جدران خلايا النبات التي تعطي الصلابة والقوة للنبات، وهي عنصر رئيس للخشب.

بدلاً من الاعتماد على مواد النفايات من عمليات منتجات الغابات. ويمكن جعل هذه العملية مستدامة مع قليل أو من دون إنتاج صافٍ من غاز CO_2، إذا تم إعادة زراعة الغابات بالكمية نفسها التي تُستَخْدم بها لتزويد الطاقة، كما ورد أعلاه. أيضاً إن إحراق نفايات بلدية صلبة (MSW) هو الآن مستخدم بكثرة، كطريقة فاعلة للتخلص من الفضلات المنزلية وكمصدر مهم للحرارة والطاقة الكهربائية. في بعض الحالات تُنفّذ هذه العملية بواسطة حرق النفايات الصلبة البلدية في مراجل بخارية معدّلة خصيصاً قادرة على التعامل مع تغير تركيب الوقود ومحتوى الرطوبة العالية لهذه النفايات، ومعالجة الكميات الكبيرة للرماد المشكّل. كانت هذه العمليات ناجحة في أوروبا بشكل خاص، حيث إن السعر العالي نسبياً للوقود التقليدي، والكثافة السكانية العالية، وفَّر حوافز إضافية لمعالجة الفضلات المنزلية بهذه الطريقة. بالإضافة إلى استخدام مراجل البخار التقليدية، هناك اهتمام متزايد باستخدام عملية تفكيك المواد بالحرارة (Pyrolysis)، أو تكنولوجيا التحويل إلى غاز (Gasification) لإنتاج غاز قابل للاحتراق من النفايات الصلبة البلدية. سوف تكون هذه التكنولوجيا في الأغلب مصدر اهتمام للتجمعات السكانية الأصغر، أو العمليات الصناعية الصغيرة، حيث إن كمية النفايات الصلبة البلدية، أو نفايات كتلة حيوية أخرى كبقايا الحيوانات، ليست كافية لتبرّر كلفة المحطة البخارية الكبيرة.

هناك طريقة أخرى لاستخدام نفايات البلدية الصلبة (MSW) كمصدر للطاقة وهي حجز غاز الميثان الذي يُنتَج نتيجة تفكك مواد الكتلة الحيوية المحتواة في مَكبات النفايات التي تستخدم للتخلص من معظم الفضلات المنزلية. يمكن استعمال هذا الغاز لتوفير مصدر من الحرارة للبيوت الزجاجية القريبة مثلاً، أو يمكن استخدامه كوقود لمحرك احتراق داخلي، أو توربين غازي، يستخدم لتوليد الكهرباء، بعد ذلك يَحصل إنتاج غاز الميثان بسبب الهضم

اللاهوائي، أو تفكك المادة الحيوية بغياب الهواء، ويحصل ذلك طبيعياً في أماكن مكبات النفايات الكبيرة، ويمكن أن يكون الميثان مصدراً مهماً لانبعاثات غازات الدفيئة إذا لم يُحجز هذا الغاز ويستخدم كمصدر للطاقة. على صعيدٍ أصغر، يمكن استخدام هاضمات لاهوائية مكوّنة لهذا الغرض، التي تعالج التدفّق المستمر لمواد نفايات الكتلة الحيوية كالسَماد الحيواني. لقد تم استخدام هذه الهَاضمات بنجاح في بعض المزارع، مثلاً، لتتعامل بشكل فاعل مع دفق من النفايات الكبيرة التي من دون هذه العملية سوف تكون مؤذية للبيئة، أو صعبة الاحتواء. ويمكن استخدام الوقود الناتج أو الغاز الحيوي (Biogas) لتوفير حرارة في المناخات الأبرد، أو كوقود محركات لتوليد الكهرباء.

إن أحد مفاتن الطاقة الحيوية هو احتمالية استخدام الوقود السائل المشتق من الكتلة الحيوية لاستبدال البنزين ووقود الديزل في تطبيقات النقل. لكن سوقه ما زالت محدودة جداً لغاية الآن، ولا يزال الإيثانول يُخلط مع البنزين بكميات قليلة جداً، وكذلك لا تزال الزيوت النباتية تُستخدم، على مستوى بسيط، بدلاً من وقود الديزل. يُخلط عادةً الزيت النباتي، يكون في بعض الأحيان على شكل زيت نفايات بعد استهلاكه في المطابخ، مع وقود الديزل لكن يمكن أن يستخدم أيضاً لوحده. يتم إنتاج الإيثانول بتخمير الذرة أو محاصيل حبوب أخرى، تماماً كما يحدث عند إنتاج بعض أنواع المشروبات المُسكِرة. وقد بيّنت بعض الدراسات أن إنتاج الإيثانول هو بحد ذاته عملية كثيفة - الطاقة. وبيّنت دراسة تحليلية لدورة الحياة أن كميات كبيرة من الطاقة مطلوبة خلال عملية التقطير لفصل الكحول عن الماء، وأيضاً لتحويل الذرة إلى وقود للجرارات ولإنتاج السماد. ووَجَد كل من باتزيك (Patzek) وبيمنتل (Pimentel)، أن إنتاج الإيثانول يتطلب ما بين 29 و57 في المئة من الطاقة الأحفورية أكثر من تلك المنتجة من الايثانول، ويعتمد ذلك على مصدر الكتلة

الحيوية المختار. من الواضح أن هذه العملية ليست عملية مستدامة، ما يعني أن إنتاجاً اقتصادياً على مستوى كبير لوقود الإيثانول بواسطة التخمير يمكن أن يكون موضع شك. ودلّت دراسات أخرى أن استخدام مخلفات المواد الأولية السللوزية كعلف الذُرة لإنتاج الإيثانول يمكن أن يكون اقتصادياً أكثر بسبب وجود مادة اللغنين في هذه المواد الأولية التي يمكن أن تستخدم كمصدر للطاقة خلال عملية إنتاج الإيثانول (see Sheehan et al., 2004). يمكن الحصول على وقود الديزل الحيوي، على شكل زيت نباتي، من نبات دوّار الشمس أو فول الصويا أو بذور اللفت. على الرغم من أن بعض الدراسات المبكرة أشارت إلى أن إنتاج الديزل الحيوي يمكن أيضاً أن يَستهلك طاقة وقود أحفوري أكثر من تلك المُحتواة في الوقود الناتج، ولكن هذه النتيجة دُحضت بواسطة دراسات أكثر حداثة (see Sheehan et al., 2004). لكن يبدو أن الموضوع بحاجة إلى جهد أكبر قبل أن نفهم بوضوح أي وقود سائل مشتق من الكتلة الحيوية، وأي عمليات إنتاج، يمكن أن تؤدي إلى بدائل للوقود الأحفوري السائل أكثر استدامة على المدى الطويل.

7. 5. الطاقة الكهرومائية

إن توليد الطاقة الكهرومائية هو أحد الاستخدامات الأكبر للطاقة المتجددة حتى اليوم، وهي عملية مفيدة لأن إنتاج الطاقة الكهرومائية لا يُنتج غازات الدفيئة أو انبعاثات هوائية أخرى. تعتبر عملية توليد الكهرباء من المحطات الكهرومائية الكبيرة تكنولوجياً ناضجة وناجحة، وقد تم استخدامها من قِبل شركات الكهرباء حول العالم كمَصدر اقتصادي للطاقة المتجددة. يَعتمد توليد الطاقة الكهرومائية على تدفّق كميات كبيرة من الماء عبر توربينات هيدروليكية، التي يمكن أن تكون بقدرة تصل حتى 700 ميغا واط. ويمكن أن تكون هذه المَحطات مشاريع «ارتفاع عالٍ» (High Head) التي تعتمد على سقوط الماء من ارتفاع كبير عبر توربينات موجودة في المجرى المنخفض لحوض

تخزين مائي كبير، أو يمكن أن تكون تصاميم «ارتفاع منخفض» (Low Head) أو «مجرى النهر» (Run-of-the-river) التي يتم فيها توليد الطاقة بواسطة تدفّق حجم كبير جداً من الماء عبر توربينات مغمورة في النهر. يمكن للمحطات الكهرومائية، وبالأخص محطات الارتفاع العالي، أن تحتل مساحات كبيرة من الأرض لتخزين المياه خلف السدود، وعادة تكون مبنية في مناطق نائية بعيدة بعض الشيء عن المراكز السكانية الرئيسة. يَعتمد تطوير مثل هذه المحطات بشكل ضروري على الجغرافيا المحلية، وتتركز معظم المحطات الكهرومائية الرئيسة الكبيرة في بلدان ذات تضاريس جبلية وبحيرات وأنهار كثيرة. تشكل الطاقة الكهرومائية الآن حوالى 18 في المئة من إجمالي الكهرباء الموَلّدة عالمياً، بينما تنتج كندا، المنتج الأكبر عالمياً للطاقة الكهرومائية، تقريباً ثلثي مجمل متطلبات الطاقة الكهربائية للبلد من المحطات الكهرومائية. تعتمد الصين أيضاً على الطاقة الكهرومائية كأحد المصادر الرئيسة لتزويد الطلب المتزايد بسرعة على الكهرباء. سوف توفّر التوربينات الستة وعشرين التي سوف تركّب أخيراً في مشروع (Three Gorges) الكهرومائي على نهر يانغ تسي (Yangtze) مثلاً، قدرة عظمى من 18 جيغا واط كهربائي عندما تكتمل في عام 2009 بعد فترة إنشاء دامت 17 سنة. على الرغم من تطوير هذا المشروع الضخم، المشروع الكهرومائي الأكبر في العالم حتى اليوم، الذي كان مثيراً للجدل، فإنه سوف يكون مصدراً رئيساً للكهرباء المتجددة لتزويد الاقتصاد الصيني المتنامي بسرعة.

على الرغم من أن التكاليف الإنشائية لمحطات الطاقة الكهرومائية تكون عادةً أعلى من تكاليف محطات الطاقة الحرارية، فإن للمحطات الكهرومائية عادةً متوسط عمر مُتوقع أطول ومن دون تكاليف وقود، وبذلك توفِّر مصدراً رخيص الكلفة للكهرباء. إن تطوير محطات كهرومائية كبيرة جديدة قرب المراكز السكانية الضخمة، أي قرب مناطق طلب الطاقة الكبير، هي الآن محدودة نوعاً ما، إذ إن

معظم مشاريع الطاقة الكهرومائية الجديرة بالاهتمام اقتصادياً قد تم تطويرها مسبقاً في أجزاء كثيرة من العالم. يعتبر ذلك صحيحاً بالنسبة إلى الولايات المتحدة مثلاً، التي لديها إحدى أكبر القدرات العُظمى الكهرومائية في العالم، لكن لديها الآن مواقع قليلة ذات ثروات كامنة ما زالت غير مستثمرة. وتم لفت الانتباه في السنوات الأخيرة إلى المشاريع الكهرومائية الصغيرة التي تكون معتمدة غالباً لدى سكان المناطق النائية أو البعيدة قليلاً. تكون هذه المحطات نموذجيةً بقدرة عُظمى أقل من 1 ميغا واط، ولا تتطلب عادةً بناء سد، لكن وبشكلٍ مختلف تعتمد على تدفّق الماء في أنهار صغيرة أو جداول. وتُبنى عادة هذه المحطات الكهرومائية الصغيرة للطاقة (أقل من 100 كيلو واط مثلاً) كوحدات مستقلة لتزويد مجموعة سكانية صغيرة، أو بالطبع مزرعة أو مراكز أعمال صغيرة أيضاً، من دون ربطها بشبكات الخدمة الكهربائية. يمكن لمثل هذه المشاريع الكهرومائية الصغيرة أن تكون شديدة الاعتدال بيئياً فمن فوائدها عدم إنتاج غازات الدفيئة كحال المحطات الكبيرة، ولا ينتج منها عادةً مشاكل بيئية واجتماعية كتلك المترافقة مع المشاريع الكبيرة، التي تؤدي إلى طوفان واسع لأودية الأنهار وترحيل بعض السكان المحليين. إن فرص إقامة مشاريع طاقة كهرومائية صغيرة جديدة تعتمد كثيراً على موقع المشروع، تماماً كما هي الحال بالنسبة إلى مشاريع الطاقة الكهرومائية الكبيرة. هناك الآن نشاط كبير في طور التقدم، تقوم به كل من الحكومات والمنظمات غير النفعية (التي لا تستهدف الربح)، لتحاول تحديد مواقع حيث من المُمكن أن تكون الطاقة الكهرومائية الصغيرة بديلاً اقتصادياً جديراً بالاعتبار من مصادر تقليدية للكهرباء.

7. 6. طاقة المحيطات

تعتبر كل من طاقة الأمواج وطاقة المد والجزر عادةً مع بعضهما البعض على الرغم من أنهما تَعملان بمبادئ أساسية مختلفة،

وربما من المفروض الرجوع إليهما كفرع من «طاقة المحيط». إن طاقة المدر والجزر هي نوعاً ما فريدة في أنها مصدر طاقة مُتجدد لا يعتمد على طاقة الشمس بالنسبة إلى قوته الدافعة الأساسية. هناك ميزة جذّابة أخرى ليست مشتركة مع مصادر طاقة متجددة أخرى، وهي أن طاقة المد والجذر بطبيعتها يمكن توقعها بشكلٍ كلي، حيث يتم توقع حركة المد والجزر بيسر من الحركة النسبية للأرض والقمر. هناك طريقتان يمكن فيهما تسخير هذا التغير المتوقع ارتفاع سطح المحيط كي يستخدم كمصدر للطاقة المتجددة.

الطريقة الأولى في تسخير طاقة المد والجزر هي باستخدام شكل من السدود، أو «حاجز مد وجزر» لحجز كميات كبيرة من المياه التي تتدفق إلى خزان للمد. عندما ينحسر المد، فإن اختلاف ارتفاع الماء بين الخزان الممتلئ ومستوى سطح البحر المُنبسط خارج الخزان يمكن استخدامه لتمرير الماء عبر توربينات هيدروليكية ذات ارتفاع منخفض، مشابهة لتلك المركّبة في المحطات الكهرومائية الكبيرة. في بعض الحالات، يمكن أيضاً ترتيب التوربينات بحيث تتولد القدرة خلال طوفان الخزان المائي خلف الحاجز، بالإضافة إلى التوليد خلال انحسار الجزر عندما يفرغ الخزان. كذلك، يتأثر هذا النوع من المحطات كثيراً بالطوبوغرافيا المحلية، حيث إن مصبات الأنهار في الأماكن ذات التغيرات العالية في المد، توفر معظم المواقع الفاعلة اقتصادياً بالنسبة إلى طاقة المد والجزر.

إن محطة المد والجزر الوحيدة ذات الحجم الكبير التي بُنيت بهذه الطريقة هي محطة لارانس (LaRance) قرب سان مالو (St.Malo) على ساحل فرنسا. دخلت هذه المحطة الخدمة في عام 1966، واستفادت من ميزة مجال المَد الذي يبلغ 8 أمتار تقريباً، وهي ذات قدرة توليد عظمى تبلغ 240 ميغاواط كهربائي. تم استخدام «توربينات بصلية» (Bulb Turbines) ذات الأجنحة القابلة للانعكاس، بحيث يمكن توليد جزء من القدرة خلال عمليات المد عندما يُملأ الخزان،

بينما يتم توليد معظم القدرة خلال تفريغ الخزان عندما ينحسر المد. تولّد التوربينات 610 جيغاواط ساعة من الكهرباء في السنة، التي تؤدي إلى مُعامل سعة أقل بقليل من 30 في المئة. هناك محطة تجريبية أصغر بكثير عند (Annapolis Royal) في منطقة خليج فندي في كندا ذات قدرة عظمى تساوي 20 ميغا واط كهربائي، وبتوليد حوالى 50 جيغاواط ساعة من الكهرباء في السنة، لديها أيضاً مُعامل سعة حوالى 30 في المئة.

تمت دراسة محطات طاقة أخرى ذات حواجز مد كبيرة، تتضمن طروحات من أجل محطات كبيرة جداً في مصب سيفرن في جنوب - غرب إنجلترا وفي خليج فندي في كندا، لكن حتى الآن لم يتم بناء هذه المحطات. السبب في ذلك هو كلفة الانشاء العالية، ما يؤدي إلى تكاليف عالية للكهرباء، وبخاصة بالمقارنة بمحطات كهرومائية من الحجم نفسه. هذه الكلفة العالية نسبةً لمحطة كهرومائية يمكن أن تُفسر باختلافين رئيسين بين محطة سد المد والجزر ومحطة مائية تقليدية. الاختلاف **الأول** هو أن علوّ الماء (Head) بالنسبة إلى محطة المد والجزر هو بالضرورة محدد بمدى المد والجزر المحلي، الذي هو عادة أقل بكثير مما هو الحال في محطة كهرومائية نموذجية، ما يحد بشدة من قدرة الخرج. أما الاختلاف **الثاني فهو ناتج من الطبيعة المتقطعة لفعل المد والجزر، ما يعني أن محطة المد والجزر قادرة فقط على التوليد عند القدرة العظمى خلال فترة قصيرة من الزمن نسبياً عندما يصل الماء المحجوز خلف سد المد والجزر إلى مستواه الذُروي. عندما يتدفق الماء المحجوز عائداً إلى البحر، فإن علوّ الماء المُتوافر يتناقص باستمرار، ما يؤدي إلى قدرة توليدية أقل. لهذا السبب فإن مُعامل السعة لمحطات طاقة المد والجزر (كما لاحظنا بالنسبة إلى محطتي لارانس وأنابوليس) محدود بـ 30 في المئة تقريباً، الذي هو أقل بكثير من مُعاملات معظم المحطات الكهرومائية الكبيرة. ينتج هذا المُعامل المنخفض من الاستثمار الضعيف لكلفة**

الإنشاء الكبيرة المطلوبة عادةً في أعمال الهندسة المدنية للتمكّن في النهاية من حجز مياه كافية خلف السد، ما يؤدي إلى دفع كلفة إنتاج الكهرباء إلى درجة أعلى.

الطريقة الثانية لحجز الطاقة من قوة المد والجزر هي في استثمار الطاقة الناجمة عن سرعة تدفّق تيارات المد والجزر التي تتشكل بانتظام في الحواجز الساحلية الضيقة كنتيجة للتغير الدوري في مستويات المحيط. تعتمد هذه التيارات، بطبيعتها، على الموقع لكن يمكن أيضاً أن تحتوي على كميات كبيرة من الطاقة بفترات يومية منتظمة. يمكن بعد ذلك توليد القدرة بغمر توربين أو أكثر في مجرى المد والجزر. تكون التوربينات المناسبة لهذه التطبيقات عادةً، مشابهة في التصميم للتوربينات الرياحية، وقد تم اختبار كل من التصاميم ذات المحاور الأفقية والمحاور العمودية. ولا تزال تكنولوجيا طاقة تيارات المد والجزر في مرحلة التطوير المبكرة جداً، وقد تم بناء مشاريع تجريبية قليلة فقط. من المحتمل أن يكون المشروع التجريبي الأضخم لطاقة المد والجزر هو التوربين التجريبي (Seaflow) المطوّر بواسطة شركة توربينات التيار البحري (Marine Current Turbines) المبيّن في الشكل (7-7). شُغّلت هذه الآلة ذات المحور الأفقي على بعد 3 كيلومترات من ساحل ديفون (Devon) قرب ليناوث (Lynmouth) في إنجلترا منذ بدايات عام 2003. وهي تستخدم دواراً (مروحة) بجناحين (بشفرتين) وبقطر 11 متراً، وقادرة على توليد 300 كيلو واط كهربائي. تم تثبيت التوربين على ركيزة رأسية ضخمة تبلغ قعر البحر، ويمكن رفعها فوق سطح الماء لمعاينتها وصيانتها، كما هو مبيّن في الشكل (7-7). سوف يُتبع هذا المشروع بتصميم ذي دوّارين (مروحتين)، الذي سوف يصمّم لكي يعمل مع جريان للماء في الاتجاهين خلال المد والجزر، وسوف يكون بقدرة عظمى 1 ميغاواط كهربائي. ولا تزال مشاريع تجريبية أخرى لتيارات المد والجزر قيد التخطيط، منها تلك التي



الشكل (7-7): مولّد تيار مد وجزر 300 كيلو واط نوع "Seaflow".

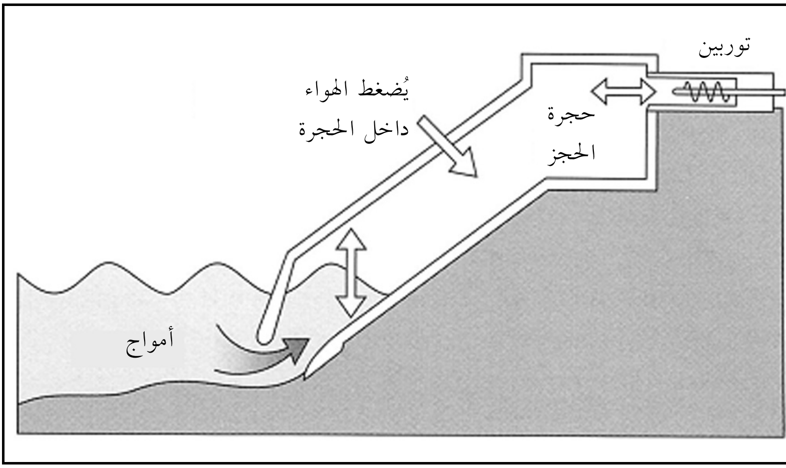
المصدر: (Marine Current Turbines).

تستخدم سلسلة توربينات ذات محور رأسي متموضعة على شكل سياج (Fence) حيث سيساعد ذلك على زيادة سرعة التدفّق عبر التوربينات في مناطق ذات تيارات مد عالية. عند توزيع أو تموضع توربينات التيارات البحرية في مناطق حيث تحدث نشاطات بحرية أخرى، يتم الاهتمام بالطبع، بالمخاطر المحتملة للمَراكب البحرية. وبالتالي من المفروض أن تدرس مسألة التصميم والتركيب لتوربينات التيارات البحرية، على أي نوع من الحجم الكبير، بعناية وبحرص على أساس موقع - بموقع.

هناك أيضاً كمية كبيرة من الطاقة موجودة في أمواج المحيطات على الصعيد العالمي، وقد تم طرح مدى كبير متنوع من الآلات لاستخراج (لتحويل) بعض من هذه الطاقة بطريقة عملية. لم تصل

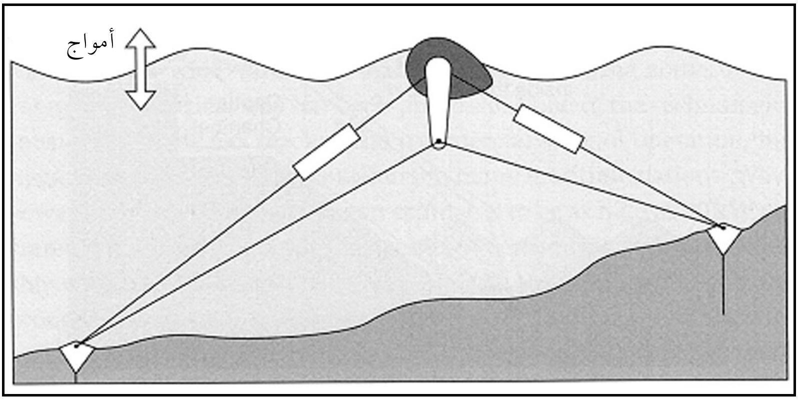
حتى الآن أي من هذه التكنولوجيات المأخوذة بالاعتبار إلى الحجم التجاري للتشغيل، لكن البحث والتطوير يستمر في بلدان بَحرية عديدة. وقد قدّرت قدرة الأمواج في المحيطات المفتوحة على أنها تبلغ 90 كيلو واط للمتر في المحيط الأطلسي الشمالي، لكنها بالطبع تختلف بشكلٍ كبير بحسب الموقع والوقت خلال السنة. من المحتمل أن تكون المملكة المتحدة، وهي بلد ذات تاريخ بحري طويل ونشيط، السبّاقة في هذا المجال، خصوصاً في اسكتلندا وشمال إنجلترا. يمكن أن تكون تجهيزات استخلاص طاقة الأمواج مصَنّفة بشكل واسع إلى مشاريع «على-الشاطىء» (On-shore) تهدف إلى استخلاص الطاقة عندما تضرب الأمواج خط الشاطىء، وإلى تجهيزات في مياه بعيدة عن الشاطئ (Off-shore) التي تعتمد على فعل الأمواج بعيداً في البحر. على الرغم من جاذبية تجهيزات الأنظمة «على- الشاطئ» بسبب بساطتها، فإنها تعاني تخفيضاً كبيراً في مقدرتها على توليد الطاقة بسبب اضمحلال الطاقة عندما تصل الأمواج إلى الشاطئ. إن إحدى أفضل التقنيات المطوّرة للأنظمة «على-الشاطئ» هي استخدام عمل الموجة في ضغط الهواء في تجويف محاط بشكل جزئي. إن معظم هذه التجهيزات، المَعروفة بأجهزة «عمود المياه المهتزة» (Oscillating Water Column - OWC)، تركّز أولاً طاقة الموجة الواردة لكي تولّد عموداً مهتزاً من الماء في التجهيزات الموجودة على الشاطئ. بعدئذٍ يَضغط عمود المياه المهتزة الهواء في قناة حيثُ يُستخدم ذلك لتشغيل توربين هوائي من أجل توليد الكهرباء. بسبب انعكاس تيار الهواء باستمرار، يستخدم في بعض الأحيان «مقوّم» لتحويل هذا الجريان إلى نمط من تدفق مستمر لتشغيل توربين بسيط. هناكَ طريقة أخرى وهي استخدام نوع خاص من التوربينات بأجنحة متناظرة، بحيث يبقى تدفق الهواء، في الاتجاهين، قادراً على تشغيل التوربين باتجاه الدوران نفسه.

من المحتمل أن يكون الجهاز الأكثر شهرةً لتحويل طاقة الأمواج «على- الشاطئ» جهاز ليمبت (Land Installed Marine Powerd Energy Transformer-Limpet) الرائد بواسطة جامعة كوين (Queen's University) في بلفاست، إيرلندا وشركة (Wavegen) البريطانية. بعد تصميم وبناء محطة نموذجية بقدرة 75 كيلو واط كهربائي، تم بناء مشروع تجريبي أكبر بكثير، صمّم ليولّد 500 كيلو واط قدرة خرج عُظمى، على جزيرة (Islay) خارج الساحل الغربي من اسكتلندا. اكتملت هذه المحطة (Limpet) الأكبر في عام 2000، ويُبيّن الشكل (7-8) مُخططاً لهذا المشروع. غير أن النتائج الأولية للمحطة كانت غير مرضية، حيث كانت قدرة الخرج أقل بكثير مما هو متوقع بالأصل. ويبدو أن الأسباب في ذلك عائدة إلى عوامل عدة، من ضمنها طاقة الأمواج المنخفضة الواصلة إلى جهاز (Limpet) وعدم الكفاءة في تحويل طاقة الموجات إلى قدرة هوائية (Pneumatic) في التوربين الهوائي ذاته. إن حفر وبناء البنية الإسمنتية الرئيسة أُنجز خلف سد انضاب مؤقت، ما يعني أن البنية المنتهية تموضعت في اليابسة على مسافة حوالى 15 متراً من الخط الساحلي. أدى ذلك إلى اضمحلال كبير في قدرة الموجة الواردة من 20 كيلو واط/ متر عند الخط الساحلي إلى 12 كيلو واط/ متر عند موقع (Limpet) الفعلي. كذلك كشفت خبرة التشغيل أن توربين ويلز (Wells) الذي يعمل مع تدفّق هوائي معكوس أيضاً، كان أقل كفاءة بكثير مما كان متصوراً بالأصل، وبكفاءة مقاسة 40 في المئة فقط. أما قدرة الخرج المُقاسة النهائية لجهاز (Limpet) فكانت 21 كيلو واط كهربائي، مقارنةً بتقدير التصميم الأوّلي الذي كان حوالى 200 كيلو واط كهربائي. يوضح هذا المشروع التجريبي أنه على الرغم من أن أمواج المحيط تحتوي على كميات كبيرة من الطاقة، فإن تحويلها إلى طاقة كهربائية مفيدة هو تحدٍ عالي الكلفة.



الشكل(7-8): مخطط Limpet جهاز عمود المياه المُهتزة.

تم اقتراح العديد من الأنواع المختلفة من أجهزة طاقة الأمواج لتعمل بعيداً من الشاطئ، واعتمد معظمها على استخدام فعل الموجة لتوفر حركة دورانية جزئية إلى أجهزة كجهاز الـ (Nodding Duck) (Salter)، أو لتحويل الحركة الرافعة البسيطة المكتسبة إلى جهاز عائم كدخل في النهاية إلى مولد كهربائي. يُبيّن الشكل (7-9) رسماً لجهاز سولتر (Salter). في هذه الفكرة، المطوّرة في جامعة إدنبره - اسكتلندا، يؤثر مرور الأمواج في حركة دورانية جزئية لجهاز شبيه بكامة (Duck)، التي هي حرة لتدور حول محور مركزي مربوط إلى قاع البحر. تستطيع بعدئذٍ الحركة الدورانية المهتزة من تشغيل مضخة هيدروليكية أو عنصر آخر لتزويد القدرة اللازمة لقيادة مولّد كهربائي. إن لهذه الأنواع من الأجهزة إيجابية الوصول إلى المقدرة الكاملة لطاقة الأمواج بعيداً من الشاطئ، من دون حصول اضمحلال للطاقة كما ورد أعلاه في حالة التجهيزات المركّبة على الشاطئ. وتعاني هذه الأجهزة التحدي في بناء أجهزة كبيرة جداً تستطيع تحمل عواصف شديدة، والحاجة إلى كلٍ من توليد الطاقة في ظروف صعبة في البحر، وفي نقل هذه الطاقة إلى الشاطئ. هناك اعتبار آخر، وهو



الشكل (7-9): جهاز طاقة الأمواج "Salter "Nodding Duck.

التعرض المُحتمل للمخاطر نتيجة حركة السفن، حيث هناك حاجة إلى تغطية مساحة كبيرة من سطح البحر لكي يتم توليد كمية معتبرة من الطاقة. لذا يستمر الكثير من الباحثين في العمل على مجال واسع من الأجهزة، وسوف تؤدي أعمال تطوير لاحقة، من دون شك، إلى التطوير نحو الأفضل لبعض هذه الأجهزة، وبذلك يمكن أن تجعل كلفة الوحدة الكهربائية من هكذا أجهزة منافسة أكثر بالمقارنة مع الكلفة من المصادر التقليدية.

7. 7. الطاقة الجيوحرارية

إن الطاقة الجيوحرارية هي مصدر الطاقة المتجددة الوحيد، غير طاقة المد والجزر التي تعتمد على الشمس كمصدرها الأولي للطاقة. تم تحديد درجات الحرارة العالية السائدة عميقاً في قشرة الأرض منذ زمن بعيد كمصدر كبير محتمل للطاقة، من أجل كلٍ من التدفئة وتوليد الكهرباء. يعتبر استخدام الطاقة الجيوحرارية عملّياً أكثر في أماكن حيث تكون درجة حرارة الأرض عالية قريباً من سطح الأرض، وهذه غالباً ما تكون قريبة من مناطق نشطة جيولوجياً والتي تزوّد ينابيع حارة أو فوهات بخارية (الحمّة). تم استخدام هذا المصدر من الطاقة بواسطة الإنسان منذ الأزمنة القديمة، عادةً على شكل حمامات

حرارية طبيعية، لكن البحث عن بدائل للوقود الأحفوري قَاد إلى اهتمامات مُتجددة في النشاط الجيوحراري. تستخدم مُعظم الطاقة الجيوحرارية مباشرةً لتوفير الحرارة للأبنية والعمليات الصناعية، وفي نهاية عام 2000 كانت القدرة الحرارية العُظمى المركبة عالمياً بالنسبة إلى تطبيقات التدفئة غير - الكهربائية أعلى من 15.000 ميغا واط حرارية بحسبَ (International Geothermal Association, 2005). تعتبر ايسلندا المستخدم الأكبر الثالث للطاقة الجيوحرارية المستخدمة للتدفئة بعد الولايات المتحدة والصين، بقدرة عُظمى حرارية حوالى 1470 ميغا واط حرارية مستخدمة في عام 2000. ومن المتوقع أن تنمو هذه القدرة كثيراً في السنوات القادمة، عندما تضع ايسلندا نفسها لتكون السبّاقة في استخدام الطاقة المتجددة. وفي بعض البلدان، وبالأخص في الولايات المتحدة، الفيليبين، المكسيك وإيطاليا، تعتبر الطاقة الجيوحرارية أيضاً مصدراً مهماً للطاقة الأولية لتوليد الكهرباء. في نهاية عام 2003 كانت القدرة العظمى لتوليد الكهرباء جيوحرارياً في العالم حوالى 8400 ميغا واط كهربائية، بكون الولايات المتحدة السباقة بحوالى 2020 ميغا واط كهربائية من القدرة العظمى المركّبة، تتبعها بشكلٍ متقارب الفيليبين بقدرة 1930 ميغا واط كهربائية. وتوفّر القدرة العظمى الجيوحرارية للولايات المتحدة أقل من 0.5 في المئة من إجمالي توليد الطاقة الكهربائية، بينما في الفيليبين تمثل هذه القدرة حوالى 22 في المئة من إجمالي التوليد. ولدى ايسلندا قدرة عظمى جيوحرارية كهربائية مركّبة أصغر بكثير وهي حوالى 200 ميغا واط كهربائية، لكن بما أنها بلد صغير جداً تشكل هذه القدرة حوالى 15 في المئة من إجمالي توليد الكهرباء.

يتم توليد الكهرباء باستخدام تكنولوجيا المحطات البخارية التقليدية، لكن تصميم مجمل النظام يختلف بشكل كبير، معتمداً على نوع مصدر الطاقة الجيوحرارية. أبسط نوع من المحطات يغذي

«البخار الجاف» المنتج طبيعياً في بعض المواقع الجيوحراية مباشرةً إلى التوربين البخاري الذي يوفر القدرة (الميكانيكية) لقيادة المولّد، تماماً كما يحدث في محطة الوقود الأحفوري التقليدية. يتم تشكيل البخار طبيعياً عندما تواجه المياه في قشرة الأرض الصخور الحارة على عمق كيلومترات عدة تحت سطح الأرض. يمكن لهذا البخار المولّد بهذه الطريقة أن يجد طريقه، في بعض الأحيان، إلى السطح عبر الشقوق الطبيعية في الصخور المحيطة، كما يتضح بنشاط الفوهات البخارية كتلك التي أصبحت مشهورة بالثوران المنتظم للفوهة البخارية (Old Faithfull) في (Yellowstone Park) في وايومينغ (Wyoming)، الولايات المتحدة. وفي معظم الحالات، إن البخار المُشكّل على عمق معيّن لا يصل بشكل طبيعي إلى السطح، لكن يمكن الوصول إليه بيسر بواسطة حفر آبار تصل إلى خزانات جيوحرارية. تكون درجة الحرارة والضغط لهذا البخار المولَّد طبيعياً عادةً أقل بكثير مما هي الحالة في محطة وقود أحفوري تقليدية، وذلك يؤدي إلى كفاءة حرارية أقل، وإلى استخدام توربينات مصممة خصيصاً لمثل هذه الحالات. أولى التجارب لمَعرفة ما إذا كان من الممكن استخدام الطاقة الجيوحراية (على شكل بخار جاف) مباشرة لتوليد الكهرباء، تم الشروع بها في لارديريلو، إيطاليا، عام 1904. بدأت هذه التجارب باختبارات استخدمت محركاً بخارياً تردّدياً صغيراً بقدرة كيلو واطات كهربائية عدة، وأدى نجاح هذه الاختبارات إلى التوسع بثبات بحيث بلغت القدرة العظمى المركّبة في لارديريلو حوالى 550 ميغاواط كهربائية. والمحطة الأخرى الوحيدة ذات البخار الجاف الموجودة حالياً، وهي المحطة الجيوحرارية الأكبر في العالم، هي محطة «الفوهات البخارية» (The Geysers) الواقعة في شمال كاليفورنيا. بدأت هذه المحطة بالتشغيل في عام 1960 بقدرة أولية عظمى تساوي 11 ميغا واط كهربائية، واليوم لديها قدرة عظمى مركّبة حوالى 1700 ميغاواط كهربائية.

ليس هناك عدد كبير من المصادر الجيوحرارية التي تُنْتِج بخاراً جافاً عند درجة حرارة وضغط مناسبين من أجل الاستخدام المباشر في توربين بخاري، وبالنسبة إلى مصادر ذات درجة حرارة أقل، التي تتألف عادةً من مياه حارة ذات ضغط عالٍ أو خليط من مياه مشبعة وبخار (عادة يدعى «بالبخار الرطب»)، هناك طريقة تدعى «البخار المندفع» (Flash-steam) يتم استخدامها. في هذه الطريقة يتم دفع السائل الحار أو البخار الرطب الطبيعي إلى وعاء حيث الضغط أقل بكثير، ونتيجة ذلك، يَندفع السائل متحولاً إلى بخار يُدفع بعدئذٍ إلى توربين بخاري ذي ضغط منخفض. يمكن أن يبقى بعض السائل عند ضغط أقل، معتمداً ذلك على ضغط ودرجة حرارة الماء الوارد أو مَصدر البخار الرطب، ويُفصل هذا السائل في الوعاء ويُعاد إلى قشرة الأرض في بئر إعادة الحقن. إن معظم المحطات الجيوحرارية تعمل بهذا الشكل، وعادةً يستعمل كل من آبار الإنتاج وآبار «إعادة الحقن» لكي يكون هناك أقل تأثير ممكن في البيئة. حتى بالنسبة إلى مصادر ذات درجة حرارة أقل، يستخدم في بعض الأحيان تصميم «دورة ثنائية» للمحطة. في هذا التصميم يستخدم مبادل حراري لنقل الحرارة من الماء الحار الصاعد من بئر الإنتاج إلى مائع ثانوي، عادة مبرِّد (مائع) أو مائع آخر ذو درجة غليان منخفضة، بحيث يمكن توليد البخار واستخدامه لإدارة توربين. في هذه الحالة، يتم تكثيف المبرّد أو المائع الثانوي بعد الخروج من التوربين ثم تتم إعادته عبر المبدِّل الحراري في حلقة مغلقة. بعد ذلك يحصل فصل كلي لسائل التشغيل المستخدم في الدورة الثنائية عن المصدر الجيوحراري، ويُرسل الماء المبرّد المُتدفّق إلى بئر الحقن مباشرة بعد خروجه من المبادل الحراري. إن التجهيزات الأكثر تخصصاً المَطلوبة من أجل محطة «الدورة الثنائية»، بالترافق مع درجة حرارة التشغيل الأقل، تؤدي إلى كلفة إنشائية أعلى مقارنةً بمحطة «بخار جاف» بسيطة. في الماضي، حَدَّت هذه الكلفة الأعلى نوعاً ما من التوسع في توليد الكهرباء

الجيوحرارية عند درجة حرارة منخفضة، لكن الأسعار المتزايدة للوقود الأحفوري والحاجة إلى مصادر طاقة مستدامة سوف تؤديان، من دون شك، إلى توسع كبير لإنتاج الطاقة الجيوحراية في العقود القادمة.

إن استخدام «مضخات حرارة مصدر - أرض» توفّر طريقة للحصول على كميات كبيرة من الطاقة الحرارية من مصادر جيوحرارية ذات درجة حرارة منخفضة جداً، أو حتى من تحت التربة بأمتار قليلة تحت سطح الأرض. بما أن درجة حرارة الأرض تبقى ثابتة فعلاً تحت سطح الأرض مباشرةً، لذا يمكن استخدامها كمصدر للحرارة في معظم أجزاء العالم. تعمل المضخة الحرارية كالثلاجة لكن بشكل معاكس، تأخذ الحرارة من الأرض عند درجة حرارة منخفضة نسبياً وبعدئذٍ ترحّلها عند درجة حرارة أعلى، من أجل الاستخدام في تطبيقات التدفئة عادةً. في مثل هذا نوع من المشاريع، يُطمر أنبوب دائري على شكل حلقة في الأرض قرب البناء المُراد تدفئته، بعدئذ يُمرر مُبرِّد (مائع التبريد) من طرف المُبخِّر للمضخة الحرارية عبر هذه الحلقة. تستخدم حرارة الأرض لتبخير المبرِّد الذي يضغط بعدئذٍ إلى ضغط أعلى ودرجة حرارة أعلى قبل نقله بالأنابيب إلى المكثّف. والمكثّف هو عبارة عن مُبادل حراري ينقل بعدئذٍ الحرارة إلى نظام تدفئة البناء عندما يبَّرد المبرِّد ويحوَّل ثانيةً إلى شكل سائل. بالطبع، يتطلب ذلك طاقة كهربائية لإدارة المضخة الحرارية لكن «بعامل أداء» للمضخة الحرارية أعلى من واحد، حيث يشكل ذلك استخدام أكثر فاعلة للكهرباء في التدفئة مقارنةً بالتدفئة باستخدام المقاومة الكهربائية. إنَّ الكلفة الإجمالية لنظام المضخة الحرارية هو أعلى بكثير من نظام تسخين بسيط بالمقاومة الكهربائية، وعندما تزداد تكاليف الطاقة، يمكن موازنة هذه الكلفة الإجمالية مع تكاليف التشغيل المخفضة. هناك فائدة مضافة لنظام المضخة الحرارية في تدفئة الأبنية، وهي أن المضخة الحرارية يمكن أن تُشغَّل عكسياً خلال فصل التبريد الصيفي، وبذلك تستطيع توفير التكييف الهوائي خلال الصيف، والتدفئة خلال

الشتاء. يمكن أن تجعل هذه الميزة المضخات الحرارية خياراً مناسباً من أجل تكييف وتدفئة وتهوئة المباني في مناطق ذات تغيرات كبيرة في درجات الحرارة من الشتاء إلى الصيف.

المراجع

Books

Boyle, Gōdfrey [et al.]. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*, Second Edition. Oxford: Oxford University Press, 2004.

Periodicals

Berndes, Goran, Monique Hoogwijk and Richard van den Broek. «The Contribution of Biomass in the Future Global Energy Supply: A Review of 17 Studies.» Biommass and Energy: vol 25, 2003, pp. 1-28.

Clark, R. «Tidal power.» *Encyclopedia of Energy Technology and the Environment*. New York: John Wiley and Sons, 1995.

Frau, J.P. «Tidal energy: Promising projects: LaRance, A Successful Industial Scale Experiment.» *Energy Conversin, IEEE Transactions*: vol. 8, Issue 3, pp. 552- 558.

Huttrer, G.W. «The Status of World Geothermal Power Generation 1995 - 2000.» *Geothermics*: vol. 30, pp. 1-27.

Pimentel, D. and W. Patzek. «Ethanol Production Using Corn, Swithchgrass, and Wood: Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower.» *Natural Resources Research*: vol. 14, no. 1, pp. 65-76.

Sheehan. J. [et al.]. «Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol.» Journal of Indusrial Ecology: vol. 7, Issue 3-4, 2004, pp. 117-146.

Thesis

Grubb, M. J. «The Integration and Analysis if Intermittent Sources on Electicity supply Systems.» (Ph.D. Thesis, Cambridge University, 1986).

Reports

Sheehan, J. [et al]. An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles. NREL Report NREL/Tp- 580-24772.

Websites

Enercon(2005). http: < //www.enercon.de/en/_home.htm > .

European Wind Energy Association (2005). < htpp://www.ewea.org/ >

International Energy Agency (2005). < http://www.oja-services.nl/iea-pvps/pv/home.htm > .

International Geothermal Association (2005). < http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php > .

Maine Solar House (2005). < http://www.solarhouse.com/ > .

Marine Current Turbine (2005). < http:www.mrineturbines.com/ > .

Middelgrunden Wind Farm (2005). < htpp://www.middelgrunden.dk/ > .

National Renewable Energy Laboratory (2005). < http://www.nrel.-gov/ > .

Northern Ireland Assembly (2005). < http:www.gov.uk/enterprise/reports/report3-01rvol1.htm > .

Tucson Elecrric Power (2005). < http://www.tucsonelectric.com > .

University of Strathclyde, Energy System Research Unit (2005). < http://www.esru.strath.ac.uk > .

US Department of Energy (2005). < http://www.energy.gov > .

8 ـ الطاقة النووية

8. 1. مقدمة

إن ورود الطاقة النووية في قسم عن «مصادر الطاقة الجديدة والمستدامة» يمكن أن يبدو مثيراً للجدل لبعض القراء. على أي حال، تعتبر الطاقة النووية اليوم مصدر طاقة رئيسياً مهماً لا يُنتج انبعاثات غازات الدفيئة بل يولّد الكهرباء. في الحقيقة، توفّر الطاقة النووية في بعض البلدان جزءاً كبيراً من توليد الطاقة الكهربائية، وتشكّل مثلاً حوالى 80 في المئة من إجمالي إنتاج الطاقة الكهربائية في فرنسا. لقد تم تطوير الطاقة النووية أساساً في خمسينيات القرن الماضي من أجل التطبيقات السلمية للكميات الكبيرة جداً من الطاقة المُحررة نتيجة إنشطار الذرات (نواة الذرة) أو «الانشطار النووي»، وفي عام 2001 شكلت الطاقة النووية 17 في المئة من توليد الطاقة الكهربائية عالمياً. وبدأت أول محطة نووية لتوليد الكهرباء بالتشغيل في روسيا عام 1954، بقدرة عظمى بلغت 5 ميغا واط كهربائية فقط. إن أول محطة نووية على صعيد تجاري كانت محطة كالدر هول (Calder Hall)، التي تم افتتاحها في المملكة المتحدة عام 1956، وهي مُؤلَّفة من أربعة مُفاعلات، لكل منها قدرة توليد كهربائية عظمى تساوي 50 ميغا واط كهربائية. خلال السنوات الأخيرة، ومع تطور الطاقة النووية، بدا أن هذا المصدر سوف يؤمّن مصدراً لا ينضب للكهرباء رخيصة الكلفة، وقد تواصلت مسألة الطاقة النووية بشدة في كثير من دول العالم المتطور. بعد التوسع الكبير خلال ستينيات وسبعينيات القرن الماضي، أدى تجاوز حدود الكلفة الكبيرة وحادثتي الطاقة النووية

الخطيرتين في ثمانينيات القرن الماضي إلى حدوث تغيير في التفكير حول سلامة وأمان وكلفة الطاقة النووية، وأدى ذلك بالنتيجة إلى تخفيض مفاجئ في بناء محطات جديدة في معظم أنحاء العالم. إن الإدراك المتنامي بأن استخدام الوقود الأحفوري في توليد الكهرباء يمكن أن يكون مساهماً كبيراً في رفع درجة حرارة الأرض، في السنوات الأخيرة، قد أدى إلى أن يعيد الكثير من البلدان تقييم الدور الذي يمكن للطاقة النووية أن تقوم به في البحث في تخفيض إنتاج غازات الدفيئة. بعد مراجعة أولى لوضع تكنولوجيا الطاقة النووية الحالي سوف نعود إلى هذه المسألة، ومع إدراك الناس وقبولهم للطاقة النووية، في نهاية هذا الفصل.

يتألف عادةً اليورانيوم الطبيعي، كما هو موجود في الطبيعة، من حوالى 99.3 في المئة يورانيوم U^{238} ، والباقي 0.7 في المئة مُكوّن من اليورانيوم النظير القابل للانشطار U^{235}. يُسخّر إنتاج الطاقة النووية الكمية الكبيرة للطاقة الحرارية التي يتم تحريرها خلال تفاعل الانشطار النووي، عندما يَمتص اليورانيوم U^{235} نيوترون وينقسم إلى نواتج انشطار بعد القذف بسيل من النيوترونات. وإن كمية الطاقة الحرارية المُحرّرة من كيلوغرام واحد فقط من اليورانيوم U^{235} التي تخضع للانشطار تكافئ الطاقة الناتجة من احتراق 2.5 مليون كيلوغرام، أو 2500 طن من الفحم الحجري. وأحد الأمور الجذابة في الطاقة النووية هي هذه «الكثافة العالية» جداً للطاقة في الوقود النووي، ما يقلل كثيراً كتلة المواد اللازمة لتوليد الكهرباء. إن اليورانيوم U^{235} في شكله الطبيعي، غير مستقر فعلاً، وجزء صغير منه يمكن أن يخضع لتفاعل انشطاري تلقائي، وينتج من ذلك عدد من نواتج الانشطار وواحد أو أكثر من النيوترونات. والنيوترونات الناتجة تدعى «النيوترونات السريعة» التي تمر بمعظم اليورانيوم U^{235} من دون أن يتم امتصاصها، متسببةً بتفاعلات انشطارية لاحقة. إذا تم إبطاء هذه النيوترونات السريعة بواسطة مواد أو مادة تسمى «الوسيط»

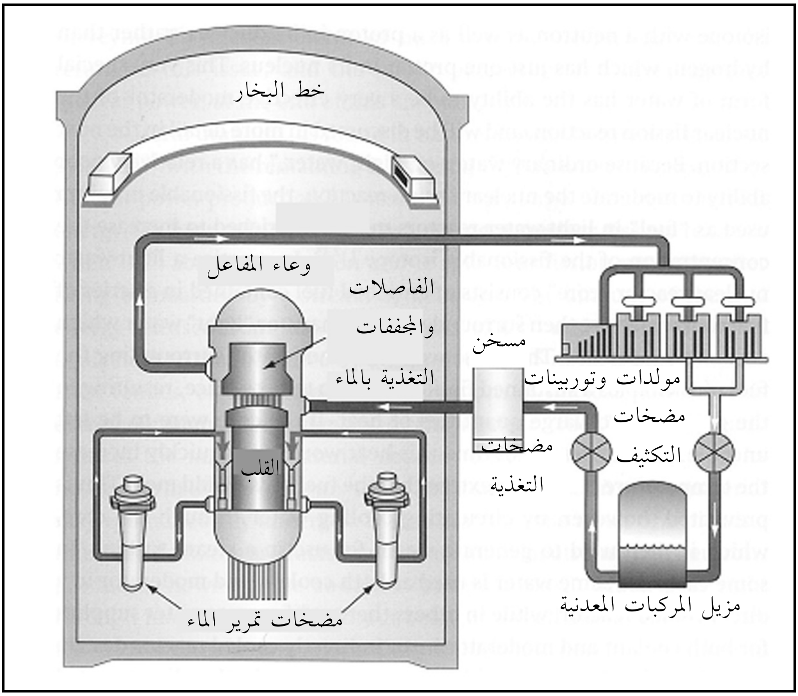
(Moderator)، عندها فقط تصبح قادرة بثبات على قدح معظم اليورانيوم U^{235} للخضوع إلى تفاعل الانشطار، مؤدياً ذلك إلى تفاعل متسلسل دائم وإلى إنتاج الحرارة. وإذا وُجد الوسيط واستمرت سلسلة التفاعل، بعد ذلك يتم إنتاج نيوترونات أكثر، التي يتم امتصاصها ويتم تحرير كمية كبيرة من الحرارة بالانشطار المستمر لليورانيوم U^{235}، التي يمكن عندها أن تستخدم في توليد البخار. يوجد العديد من المواد المختلفة التي تعمل بشكل فاعل كوسيط لإبطاء النيوترونات السريعة لتشكيل التفاعل المتسلسل، لكن الأكثر شيوعاً في الاستخدام هي الماء العادية والغرافيت، و«الماء الثقيل». سوف يُشرح استخدام هذه المواد بتفصيل أكثر في الفقرات التالية التي تصف الأنواع الرئيسة للمفاعلات النووية التجارية المستخدمة حالياً لإنتاج الطاقة النووية.

8. 2. مفاعلات الماء الخفيف

تعتمد معظم محطات الطاقة النووية العاملة اليوم على استخدام مفاعلات «الماء الخفيف»، كمصدر للحرارة في توليد البخار لإدارة مولّدات التوربين البخاري التقليدي. يطلق على هذا النوع من المفاعلات تسمية «مفاعلات الماء الخفيف»، وذلك لتمييزها بشكل رئيس من مفاعلات «الماء الثقيل»، إذ يستخدم الماء العادي كوسيط وكمبرّد لسحب الحرارة وإنتاج البخار. أما الماء الثقيل فهو ماء يحتوي الديوتيريوم (Deuterium)، وهو نظير الهيدروجين بوجود نيوترون بالإضافة إلى البروتون في نواته، على عكس الهيدروجين الذي لديه بروتون فقط في النواة. هذا الشكل الخاص للماء لديه قابلية على أن يكون وسيطاً فاعلاً جداً للتفاعل النووي الانشطاري، وسوف يناقش بتفصيل أكثر في الفقرة التالية. بما إن لدى الماء العادي أو «الماء الخفيف» قابلية ضعيفة ليعمل كوسيط في تفاعل الانشطار النووي، لذلك يجب زيادة تخصيب اليورانيوم الانشطاري المستخدم كوقود في مفاعلات الماء الخفيف لزيادة تركيز اليورانيوم

U^{235} النظير الانشطاري. من الناحية العملية، يتألف قلب مفاعل الماء الخفيف النووي من وقود مخصّب يتم احتواؤه في سلسلة من قضبان الوقود التي تتم إحاطتها بعد ذلك بالماء العادي أو الخفيف الذي يعمل كوسيط. إن وجود هذا الوسيط المحيط بقضبان الوقود يمَكِّن من حدوث تفاعل انشطاري مستمر، مؤدياً إلى توليد كميات كبيرة من الحرارة. إذا تُرك قلب المفاعل من دون تبريد لفترة من الوقت فإن هذه الحرارة سوف ترفع درجة حرارة المفاعل بشكل سريع جداً إلى حد كبير، ما يجعل القضبان تنصهر. ويتم تجنّب هذه الحالة بتمرير ماء التبريد عبر القلب، الذي يستخدم بعدئذٍ لتوليد البخار من أجل استخدامه في توربين بخاري. في بعض الحالات يستخدم الماء نفسه كمبرّد ووسيط في الوقت نفسه في مفاعل مبرَّد مباشرةً، بينما في مفاعلات أخرى توجد مصادر منفصلة للماء لكل من الماء المبرّد والماء الوسيط في تصميم لمفاعل مبرَّد بشكل غير مباشر.

إن أبسط أنواع مفاعلات الماء الخفيف هو «مفاعل الماء المغلي» المبرّد مباشرةً أو (Boiling Water Reacter) أو (BWR) الذي يُستخدم فيه الماء نفسه كوسيط وكمبرّد، وكبخار لإدارة توربين المولّد. يبيّن الشكل (8-1) مخططاً لهذا النوع من المحطات (US Nuclear Regulatory Commission, 2006). في هذه البنية يتم ضخ الماء من مكثّف المحطة إلى وعاء المفاعل (وعاء ضغط فولاذي كبير) بواسطة مضخات التغذية. عندما يمر الماء عبر قلب المفاعل فإن جزءاً منه يغلي، ويرتفع بخار الماء المتشكل إلى قمة الوعاء حيث يتم سحبه وإعادته ثانيةً لتغذية التوربين البخاري ليوفّر القوة الدافعة لإنتاج الكهرباء. لنضمن دوراناً جيداً للماء حول القلب وتبريد مُناسب لقضبان الوقود، يتم أيضاً تأمين عدد من مضخات التدوير. يمكن أيضاً رؤية عدد من قضبان التحكم مارةً عبر قاعدة وعاء المفاعل وداخلةً إلى قلب المفاعل. تُصنع هذه القضبان من مواد مثل الكادميوم أو البورون الذي يمتص النيوترونات بقوة، ويمكن أن تستخدم



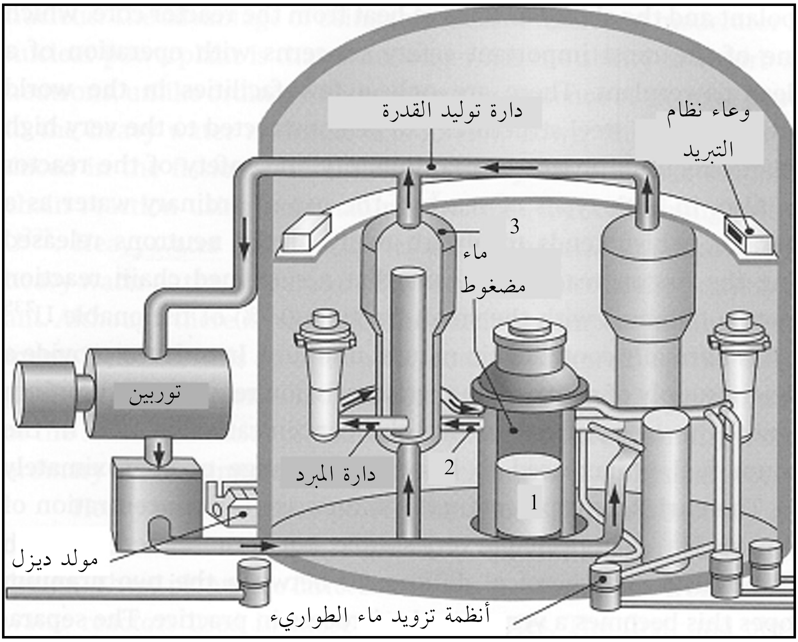
الشكل (8-1): مفاعل الماء المغلي (BWR).

المصدر: US Nuclear Regulatory Commission .

للتحكم بدرجة التفاعل بواسطة تحريك هذه القضبان إلى داخل قلب المفاعل أو إلى خارجه. ويعادل تحريك قضبان التحكم خارج القلب يعادل زيادة معدل التفاعل الانشطاري في محطة الوقود الأحفوري التقليدية، بينما تحريكهم كلياً إلى قلب المفاعل يسبب وقوف التفاعل الانشطاري كلياً. عادةً يكون وعاء المفاعل والتجهيزات المساعدة كمضخات تمرير الماء وآلية قضبان التحكم محتواة في بناء إسمنتي، ذي جدران سميكة تعمل على امتصاص أي زيادة إشعاعية يمكن أن تمر عبر جدران وعاء المفاعل نفسه. وعلى الرغم من أن مفاعلات الماء المغلي (BWRs) بسيطة جداً من حيث المبدأ، إلا أن تغيُّر طور الماء من سائل إلى بخار ضمن قلب المفاعل يقدّم بعض تحديات

التحكم، جاعلاً هذا النوع من المفاعلات أقل شيوعاً من أقرانه مفاعلات الماء المضغوط (Pressurized Water Reactor - PWR) المبرّدة بشكل غير مباشر.

يُبيّن الشكل (8-2) مخططاً لمفاعل الماء المضغوط (PWR) (US DOE-EIA, 2005)، ويشير إلى أنه تم استخدام دارتي ماء منفصلتين في هذا النوع من التصميم، وبذلك يتم نقل الحرارة، المتولّدة في قلب المفاعل، بشكل غير مباشر إلى الدارة البخارية المستخدمة لإدارة المولّد التوربيني. يتم تمرير الماء في دارة المبرّد الأولية، تحت ضغط عالٍ باستمرار عبر قلب المفاعل بواسطة عدد من مضخّات المبرّد. ويتم الحفاظ على هذا المبرّد الأوّلي الذي يعمل أيضاً كوسيط، تحت ضغط عالٍ كافٍ بحيث لا يغلي أبداً عند درجات حرارة يتم الوصول إليها في وعاء المفاعل. بهذه الطريقة، يتم تجنّب مشاكل التحكم المترافقة مع الماء الخاضع لطور التحول من سائل إلى بخار، ما يؤدي إلى نظام تحكم مبسّط مقارنةً بذلك المستخدم في تصميم مفاعل الماء المغلي. تقوم مضخات المبرّد بتمرير ماء المبرّد الأوّلي باستمرار عبر قلب المفاعل وخارجاً إلى سلسلة من المبادلات الحرارية التي تستخدم لنقل الحرارة من المبرّد الأوّلي إلى نظام مبرّد مائي ثانوي الذي تتم المحافظة عليه تحت ضغط أقل، وبالتالي يغلي ماء المبرّد الثانوي موفراً مصدراً ثابتاً من البخار لإدارة مولّد التوربين البخاري. لقد برهن هذا الفصل بين المبرّدين الأوّلي والثانوي على أنه تصميم فاعل جداً، لذا نرى أن مفاعل الماء المضغوط (PWR) هو النوع الأكثر شيوعاً لمحطات المفاعل النووي المستخدم حالياً. وهو النوع الأكثر انتشاراً في الولايات المتحدة، أكبر منتج عالمي للكهرباء النووية، والمستخدم حصرياً في فرنسا، ثاني أكبر منتج عالمياً. في الحقيقة، من ضمن 440 مفاعلاً تقريباً، العاملة حالياً في العالم، هناك أكثر من نصف هذه المفاعلات من نوع الماء المضغوط (PWRs).



الشكل(8-2): مفاعل الماء المضغوط (PWR).

المصدر: DOE- EIA.

إن أحد العوامل المشتركة لكل من تصاميم مفاعلات الماء المغلي (BWR) ومفاعلات الماء المضغوط (PWR) هو الحاجة إلى أوعية ضغط قوية وكبيرة جداً، وهي ضرورية من أجل احتواء قلب المفاعل، وأيضاً لتَحمّل درجات الحرارة العالية والتدفقات الإشعاعية المتأصلة في توليد مستويات طاقة عالية. يمكن لوعاء المفاعل أن يكون بقطر خمسة أمتار تقريباً، وبارتفاع 15 متراً، وبسماكة جدارية أكثر من 20 سم. إن أي تصدّعات أو تشققات في وعاء المفاعل والأنابيب المرافقة يمكن أن يؤدي إلى فقدان المبرّد وفقدان المَقدرة على سحب الحرارة من قلب المفاعل، الذي هو أحد احتياطات الأمان الأكثر أهمية في تشغيل المحطة النووية. هناك بعض المؤسسات القليلة في العالم يمكن أن يتم بواسطتها إنشاء مثل هذه الهياكل الفولاذية الكبيرة وفق معايير عالية جداً مطلوبة لتضمن تكامل

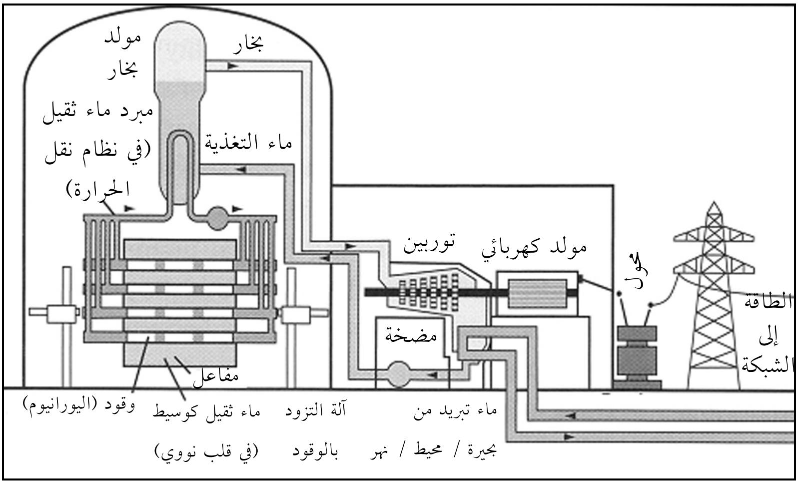
قلب المفاعل وسلامته. كذلك، إن استخدام الماء العادي كوسيط، الذي يميل إلى امتصاص الكثير من النيوترونات المحررة خلال تفاعل الانشطار، في النوعين من المفاعلات، يعني أن تفاعلاً متسلسلاً مستمراً لا يمكن أن يتم الحصول عليه بجزء صغير (0.7 في المئة) من اليورانيوم U^{235} القابل للانشطار الذي يوجد عادةً في اليورانيوم الطبيعي. ولكي نوفر كمية كافية من النيوترونات للمحافظة على استمرارية تفاعل الانشطار يحتاج وقود اليورانيوم إلى تخصيب بحيث يزداد تركيز اليورانيوم U^{235} في وقود اليورانيوم ليصل إلى ما بين 3 و5 في المئة تقريباً. وعملية التخصيب المستخدمة لزيادة تركيز اليورانيوم U^{235} الانشطاري هي من حيث المبدأ بسيطة جداً، لكن بسبب وجود اختلافات فيزيائية وكيميائية صغيرة بين نظيري اليورانيوم تصبح العملية معقدة جداً من الناحية العملية. كما تحتاج عملية فصل النظيرين إلى الاعتماد على الاختلاف البسيط في عدد النيوترونات المحتواة في نواتي ذرتيهما، الذي يؤدي إلى تغيّر صغير جداً في كتلتيهما الذريتين الخاصتين بهما. ويمكن تنفيذ التخصيب باستخدام تقنيات الانتشار الغازي، أو طريقة الطرد المركزي للغاز. ففي عملية الانتشار الغازي يتم أولاً تحويل المادة الخام من اليورانيوم سداسي الفلوريد (Uranium hexafluoride) إلى طور غازي بواسطة التسخين، وبعد ذلك يتم دفعها عبر سلسلة من الأغشية المسامية الخاصة التي تسمح بشكل مفضل بعبور النظير الأخف: اليورانيوم U^{235}. أما عملية الطرد المركزي للغاز فتستخدم عدداً كبيراً من أجهزة الطرد المركزي ذات السرعة العالية والتي تدفع بشكل أفضل النظير الأثقل: اليورانيوم U^{238}، باتجاه بعيد عن مركز الوعاء الدوّار، حيث يمكن استخلاصه وإبقاء الغاز المتبقي مخصّباً باليورانيوم U^{235}. هناك بلدان قليلة جداً فقط لديها تجهيزات التخصيب هذه، وبسبب قابلية اليورانيوم المخصّب لاستخدامه في إنتاج الأسلحة النووية، تتم مراقبة هذه التجهيزات عن قرب بواسطة المجتمع الدولي.

8. 3. مفاعلات الماء الثقيل

إذا تم استخدام وسيط أكثر فاعلية من الماء العادي في تمكين تفاعل الانشطار، عندها يمكن جعل اليورانيوم الطبيعي محافظاً على تفاعل الانشطار بدلاً من المادة المخصّبة، ويمكن عند ذلك أن يستخدم اليورانيوم الطبيعي مباشرة لتزويد المفاعل النووي بالوقود. ويعتبر الماء الثقيل أو أكسيد الديوتيريوم، وهو ماء تم فيه استبدال ذرّة الهيدروجين العادية بذرّة الديوتيريوم، وسيطاً أكثر فاعلية. تكمن حسنة استخدام هذا الشكل من الماء كوسيط في محطة نووية، في أن هذا الوسيط ليس لديه قابلية امتصاص النيوترونات المتناثرة، بعكس الماء العادي. كذلك، إن وجود نيوترون إضافي في جزَيء الماء الثقيل يعمل على إبطاء «النيوترونات السريعة» المنتجة في مفاعل الانشطار، وهكذا تستطيع هذه النيوترونات افتعال تفاعل تسلسلي مستمر باستخدام وقود اليورانيوم الطبيعي المحتوي فقط على 0.7 في المئة من اليورانيوم U^{235}. بالتالي، تستخدم مفاعلات الماء الثقيل وقود اليورانيوم الطبيعي والماء الثقيل كوسيط يُستَخدم في بعض الأحيان أيضاً كمبرّد أولي. وفي هذه الحالة لا توجد حاجة إلى تجهيزات تخصيب اليورانيوم المعقّدة، لكن ذلك يتم على حساب الحاجة إلى إنتاج الماء الثقيل. ويتم ذلك بواسطة زيادة تركيز الكميات الصغيرة لأكسيد الديوتيريوم الذي يوجد طبيعياً في الماء العادي باستخدام تركيب من عمليات فيزيائية وكيميائية.

تم تطوير محطات نووية بالماء الثقيل بشكل واسع في كندا، باستخدام تصميم (Canadian Deuterium Uranium) أو كاندو «CANDU». تختلف هذه المحطات في ناحيتين رئيستين عن مفاعلات الماء الخفيف المستخدمة في معظم البلدان. في الناحية **الأولى**، الاختلاف الواضح هو استخدام الماء الثقيل في كلٍ من الوسيط والمبرّد الأوّلي، الذي يجعل استخدام اليورانيوم الطبيعي ممكناً، حيث يتم إنتاجه بكميات كبيرة في كندا كوقود. في الناحية

الثانية، وهو الاختلاف الأقل علماً به، هو أن مفاعلات (CANDU) تستخدم مفاعلاً ذا قلب مصمم من نوع «أنبوب ضغط»، بدلاً من تصميم «وعاء ضغط» المستخدم في مفاعلات الماء الخفيف. وتكمن حسنة هذا التصميم في أن المبرّد ذا الضغط العالي، بالإضافة إلى الوقود النووي، تمَ وضعهما في سلسلة من أنابيب صغيرة نسبياً (قطر 10 سم) بدلاً من وضعهما في وعاء واحد كبير ومضغوط. وبما أن لهذه الأنابيب قُطراً أصغر بكثير من قطر وعاء مُفاعل كبير وحيد، يمكن أن تكون أنابيب الضغط أقل سماكة بكثير (حوالى 5 مم) بدلاً من أن تتطلب 20 سم أو أكثر لسماكة الجدار المستخدم في وعاء كبير وحيد. يمكن تصنيع هذه الأنابيب بيسر في معظم أجزاء العالم، وهكذا لا يَعتمد بناء محطة «كاندو» (CANDU) على المقدرة في صناعة أوعية الضغط الكبيرة جداً، التي توجد فقط لدى بلدان قليلة. يبيّن الشكل (8-3) مخططاً لمحطة نووية نوع (CANDU) (AECL, 2005). يمكن مشاهدة أنابيب الضغط في موقع أفقي مارةً عبر وعاء «أنابيب المبخرة»، الذي تمت تعبئته بالماء الثقيل ليعمل كوسيط بالنسبة إلى وقود اليورانيوم الطبيعي. يتم وضع الوقود في سلسلة من «الحِزَم» التي توضع داخل كل أنبوب من أنابيب الضغط، وتصمم هذه بحيث أن المبرّد الرئيس (أيضاً الماء الثقيل) يستطيع الدوران عبر الحزم عندما يُضخ عبر أنابيب الضغط بواسطة مضخات نقل الحرارة. يَلتقط مبرّد الماء الثقيل الأوّلي الحرارة من التفاعل الانشطاري عندما يمر عبر أنابيب الضغط، وبعد ذلك تنتقل الحرارة عبر سلسلة من الدارات في وعاء مُولّد البخار. يتكوّن مُولّد البخار ببساطة من مبادل حراري ينقل الحرارة من مبرّد الماء الثقيل الأوّلي الدائر إلى مبرّد الماء العادي الثانوي الذي يَغلي لإنتاج البُخار لإدارة المولّد التوربيني. ويبيّن المخطط أيضاً ميزة فريدة أخرى لنظام (CANDU) التي هي آلة التزويد بالوقود الأوتوماتيكية الموضوعة عند كل نهاية من وعاء القلب النووي. وبما أن وقود اليورانيوم الطبيعي يَنضُب من اليورانيوم U^{235}



الشكل (8-3): مُفاعل الماء الثقيل (CANDU)

المصدر: AECL.

الانشطاري أسرع بكثير مما هو عليه الحال في مفاعل يَستخدم وقوداً مخصّباً، يَحتاج الوقود إلى التبديل بشكل أكثر تكراراً. تقوم بذلك آلات التزوّد بالوقود أوتوماتيكياً خلال عمل المفاعل، ما يستبعد الحاجة إلى إيقاف المفاعل عند التزود بالوقود، كما يحصل مع مفاعلات الماء الخفيف.

8. 4. أنواع أخرى من المُفاعلات

في المملكة المتحدة، استخدم الجيل الأول من المحطات النووية التجارية، كتلك التي في منطقة كالدرهول، الغاز بدلاً من الماء كمبرّد أوّلي. يَستخدم هذا التصميم مراوح كبيرة لدفع غاز CO_2 عبر قلب المفاعل لسحب الحرارة ثم نقلها إلى ماء عادية في سلسلة من المبادلات الحرارية، أو المولّدات البخارية. تتم عادةً تسمية هذه المفاعلات بمفاعلات «ماغنوكس» (Magnox)، حيث يكون وقود اليورانيوم معبّأً داخل غلاف من أكسيد المغنزيوم. يستخدم

الغرافيت كوسيط، الذي يَسمح باستخدام وقود اليورانيوم الطبيعي. أُتبِع هذا النوع من المفاعلات بالمفاعل المتقدم المبَرّد بالغاز (Advanced Gas Reactor - AGR) في الجيل الثاني للمفاعلات المبرّدة بالغاز في المملكة المتحدة. يَستخدم هذا النوع أيضاً أُكسيد الكربون كمبرّد، بالإضافة إلى وسيط الغرافيت، لكنه يستخدم في هذه الحالة وقود اليورانيوم المخصّب ويعمل المفاعل عند درجات حرارة وضغوط عالية، وهكذا تكون حالة البخار مشابهة إلى تلك الموجودة في محطة وقود أحفوري. على الرغم من أن مفاعلات الغاز المتقدمة (AGRs) قد برهنت على أنها آمنة وتعمل بكفاءة عالية، إذ عانت بعض مشاكل الموثوقية، كما أن تشغيلها مكلّف أيضاً. إن آخر محطة نووية بُنيت في المملكة المتحدة هي «محطة سايزويل» (Sizewell B)، التي كانت أكثر من تصميم مفاعل ماء مضغوط (PWR) تقليدي مُبرّد بالماء الخفيف. ولم يتم بناء محطات نووية أخرى في المملكة المتحدة منذ افتتاح محطة سايزويل B في عام 1995، على الرغم من أن الحكومة البريطانية أشارت في سياسة حديثة للطاقة، أنها سوف «تحافظ على الخيار النووي مفتوحاً». ومن غير الواضح في ما إذا بُنيت أي محطات جديدة ستكون مُبرّدة بالغاز، أو أنها سوف تكون مبنية على تصميم مفاعل ماء مضغوط أكثر من تقليدي، أو على تصميم مفاعل ماء مغلي استخدم في كثير من باقي بلدان العالم.

وفي دول الاتحاد السوفياتي السابق، تم في الدرجة الأولى استخدام نوعين مختلفين من تصاميم مفاعل مبرّد بواسطة الماء الخفيف. يَستخدم التصميم **الأول** الذي تدعى مُفاعلاته بنوع (RBMK)، سلسلة من أنابيب الضغط من أجل احتواء الوقود النووي، مشابهة لتصميم (CANDU) الكندي، لكن هذه الأنابيب موجهة في وضعية رأسية عبر كتلة وسيط من الغرافيت، كما أنه يستخدم الماء الخفيف كمبرّد. إنها أيضاً مفاعلات مبرّدة مباشرة، مشابهة لتصميم مفاعل الماء المغلي، حيث يتم تحويل ماء المُبرّد

الأوّلي إلى بخار ضمن المفاعل، وبعدئذٍ يغذّى مباشرةً إلى وحدة مولِّد ـ توربين. هناك ضعف واحد مع هذا التصميم، حيث إنه مع ثبات مستوى فعل الوسيط المؤَمّن بواسطة الغرافيت، القابل أيضاً للاحتراق، فإن تشكيل بخار إضافي في القلب يمكن أن يخفّض من القابلية على إزالة الحرارة من دون تخفيض شدة تفاعلات الانشطار الحاصلة. ما يمكن أن يؤدي إلى نظام تشغيل غير مستقر بالنسبة إلى المَحطة، الذي للأسف تم توضيحه في الطريقة المحتملة والأسوأ خلال الحريق الخطير وانصهار القلب لأحد مفاعلات تشرنوبل (Chernobyl). تم توثيق هذا الحادث عام 1986، بأنه الحادث النووي الأسوأ في التاريخ، مؤدياً إلى فقدان حياة أشخاص، وطارحاً تقريباً التوقف التام لإنشاء مفاعلات (RBMK) في المستقبل.

أما النوع **الثاني** من المفاعلات المستخدم في المحطات النووية الروسية فيدعى بنوع (VVER)، وهو تصميم يعتمد الماء الخفيف كمبرّد ووسيط مشابهاً كثيراً لمفاعل الماء المضغوط المستخدم في البلاد الغربية. وهو تطوير لمفاعلات استُخدمت في تزويد الغواصات النووية بالطاقة، وكجميع مفاعلات الماء المضغوط فهو، بشكلٍ طبيعي، أكثر أماناً من تصميم (RBMK).

تستخدم المُفاعلات المُولّدة (Breeder Reactors)، كما تدل عليها التسمية، لإنتاج مصادر إضافية من الوقود النووي الانشطاري. فقد لاحظنا سابقاً أن اليورانيوم الطبيعي يتألف من 99.3 في المئة من اليورانيوم U^{238} والباقي 0.7 في المئة من النظير الانشطاري U^{235}. وخلال تشغيل المُفاعل النووي يؤدي التدفق العالي للنيوترونات عادةً إلى تحويل بعض من اليورانيوم U^{238} «المُبَدّد» إلى نظير بلوتونيوم Pu^{239}، الذي يستطيع بيسر أن يخضع لتفاعل انشطاري. يعامل البلوتونيوم Pu^{239} عادةً كناتج ثانوي غير مرغوب فيه، على الرغم من أنه عنصر عالي الإشعاع، لذا يجب التعامل معه بحرص. وإذا تمت إعادة المعالجة للوقود المستهلك، يمكن فصل البلوتونيوم

عن بقية نواتج الانشطار ويمكن استخدامه لاحقاً كوقود. توجد فقط كميات صغيرة من هذه المادة الانشطارية من صنع الإنسان تمَ تكوينها في مفاعلات الطاقة التقليدية لأن معظم النيوترونات الناتجة هي «بطيئة» بسبب وجود الوسيط. يمكن استخدام مفاعل مولِّد خاص، من دون وجود وسيط، وباستخدام وقود اليورانيوم المخصّب، لإنتاج كميات أكبر بكثير من البلوتونيوم Pu^{239} الانشطاري. يمكن لهذه المفاعلات أن تُنتج وقوداً أكثر بكثير مما تستهلك، ويمكن أن يُخزّن بعد ذلك البلوتونيوم Pu^{239} من أجل استخدامه كوقود في مفاعلات الطاقة التقليدية. بهذه الطريقة، يمكن الاستفادة من جزء أكبر بكثير من مصدر طاقة اليورانيوم الطبيعي بالمقارنة مع ما هو ممكن حالياً في المفاعلات التقليدية. وقد أشارت التقديرات إلى أنه، بهذه الطريقة، يمكن في النهاية أن يستخدم حتى نصف اليورانيوم المحتوى في اليورانيوم الطبيعي كوقود نووي، بدلاً من 0.3 في المئة فقط كما هو الحال حالياً. سوف يكون لهذه الاستفادة من اليورانيوم الطبيعي (الأفضل بكثير) التأثير في توسيع توافر مخزون الوقود النووي بعامل أكثر من 100. على الرغم من أن بلداناً متعددة قد شَغَّلت مفاعلات موَلّدة تجريبية، لكن لايوجد هناك برامج لمُفاعلات موَلّدة على مستوى تجاري قيد التنفيذ.

8. 5. تصاميم مفاعلات متقدمة

مرّت المشاريع التجارية للطاقة النووية من بداياتها في خمسينيات القرن الماضي حتى اليوم عبر جيلين من التصاميم. الجيل **الأول** كان عبارة عن محطات تجريبية، تهدف إلى تبيان أن الطاقة النووية هي تكنولوجيا تجارية ذات جدوى من أجل توليد الكهرباء. وتتضمن هذه المحطات مفاعلات الماغنوكس (Magnox) المبرّدة بالغاز في المملكة المتحدة، والجيل الأول من تصاميم مفاعلات الماء المضغوط من ويستنغهاوس (Westinghouse) في الولايات المتحدة، والفراماتوم (Framatome) في فرنسا، وتصاميم مفاعل الماء

المغلي (BWR) المبكّرة من جنرال إلكتريك (GE) في الولايات المتحدة. إن كثيراً من هذه الوحدات كان لديها قدرة خرج معتدلة أقل من 100 ميغا واط كهربائية، ومعظمها وصل الآن إلى نهاية حياته التصميمية المفيدة، وكثير منها تم بالنتيجة إغلاقها. أما الجيل **الثاني** للمحطات النووية فكان عبارة عن محطات تجارية كبيرة مكتملة، وعادة بحجم 500 ميغا واط كهربائية، أو أعلى، وقد برهنت على أنها العمود الفقري لصناعة الطاقة النووية حتى اليوم. إن كثيراً من هذه المحطات تصل الآن إلى نهاية عمرها التصميمي، وقد طوّر علماء الطاقة النووية جيلاً جديداً من كلٍ من مفاعلات الماء الخفيف والماء الثقيل. يميل هذا الجيل الثاني من المفاعلات ليكون بتصاميم غير مُتكررة، حيثُ تشمل كل محطة جديدة بعض المَيزات التصميمية نتيجة الخبرة المُكتسبة في تشغيل الوحدات السابقة. وقد أدت هذه الممارسة التطوّرية، مع العديد من التغُيرات في تصاميم أُدخلت خلال بناء المَحطات، إلى الميل لزيادة كلفة إنشاء مَحطات الجيل الثاني. أما التصاميم الجديدة للجيل الثالث التي تم اقتراحها فجميعها تستخدم تصميماً ذا وحدات مستقلة (Modular Design) لتبقي كلفة الإنشاء منخفضة، وقد شملت أيضاً عدداً من ميزات التصميم الجديد، هادفةً إلى تعزيز الأمان والوثوقية. كذلك ازدادت أيضاً أحجام الوحدات، وهي الآن تتراوح من 600 ميغا واط كهربائية إلى 1600 ميغا واط كهربائية بالنسبة إلى المنشآت الأكبر.

في الولايات المتحدة، طوّرت شركة ويستنغهاوس الكهربائية (Westinghouse Electric Company, 2005) تصاميم مفاعلات ماء مضغوط جديدة (PWRs) ذات كُتل مستقلة لأجل كلٍ من محطات 600 ميغاواط كهربائية و1000 ميغا واط كهربائية، وتدعى هذه، على التوالي، بتصاميم (AP600) و(AP1000). كما طوّرت شركة جنرال إلكتريك (General Electric Company - GE, 2005) في الولايات المتحدة أيضاً، مفاعل الماء المغلي المتقدم (ABWR) بقدرة 1350

ميغا واط كهربائية، وتم في الفترة الأخيرة تصميم مفاعل يدعى بـ«الجيل الثالث+»، «مفاعل الماء المغلي المبسّط الاقتصادي» (ESBWR). يوفر هذا التصميم (1500 ميغا واط كهربائية) تبسيطاً أكثر عن فكرة (ABWR)، ويَشمل سمات «الأمان غير الفاعل» بالتصميم من أجل التمرير الطبيعي لماء التبريد عبر قلب المفاعل. بهذه الطريقة، في حال الفشل التام لمحطة الطاقة، لن تتطلب المسألة مضخات لتزويد دوران ماء كافٍ للتحكم بدرجة حرارة القلب، وهكذا فإن إمكانية حدوث انصهار القلب سوف تستبعد نهائياً. يَتطلب تصميم (ESBWR) مَضخّات وصمّامات أقل مقارنةً بتصاميم الجيل السابق، ما يؤدي إلى مساحة أصغر وكلفة أقل للمحطة. تعتبر هذه الصفات المميزة كلها جذّابة للزبائن المتَوقعين، فقد عَبرت شركات طاقة عدة عن اهتمامها باستخدام (ESBWR) لبناء محطات جديدة، مفترضةً أن جميع المتطلبات القانونية قد أُكملت بنجاح.

أدى التجديد الكبير في التصميم في كلٍ من مفهومي مفاعل الماء المضغوط (PWR) ومُفاعل الماء المغلي (BWR) المتقدمين، إلى تحسين الأمان وإلى تكاليف انشاء مُنخفضة. وإن أحد المَحاسن الأخرى لهذا النوع من التصميم ذي الوحدات المستقلة والبناء هو التقليل في الزمن المطلوب لبناء المحطة النووية إلى ما بين 3 و4 سنوات، أي أقصر بكثير من الزمن المطلوب لبناء محطات الجيل الثاني. أثر هذا الزمن الأقصر للإنشاء بِشكلٍ رئيس في تخفيض تكاليف الإنشاء، بتقديرات لكلٍ من مفاعلي جنرال إلكتريك (GE)، وويستنغهاوس اللذين يعملان على الماء الخفيف، ضمن مجال يتراوح بين 1400 و1600 دولار لكل كيلو واط كهربائية مركّب. إن مفاعل الجيل الثالث في أوروبا، (EPR1600) (مفاعل ضغط أوروبي) هو تصميم ذو 1600 ميغا واط كهربائية (Framatome, 2005) تم تطويره بالمشاركة مع مجموعة من فراماتوم (Framatome) وسيمنز (Siemens).

إنه تطور لوحدات الماء المضغوط (PWR) التي بُنيت سابقاً في فرنسا وألمانيا، مع التأكيد ثانيةً على البنية ذات الوحدات المستقلة لتحسين الأمان وتقليل زمن الإنشاء وتكاليفه. وتعتبر أولكيليوتو 3 (Olkiliuto 3) في فنلندا أول محطة (EPR1600) يتم طلبها تجارياً، وهي الآن قيد الإنشاء، على أن تبدأ في عام 2009 بحسب الخطة(*). لكي لا يتم التفوق عليها من قبل منافسيها بمفاعلات الماء الخفيف، ومن جهتها لا تزال وكالة الطاقة النووية الكندية (AECL) تعمل على تطوير شكل آخر من الجيل الثالث لمُفاعل (CANDU) ذي الماء الثقيل المضغوط. ويعتبر مُفاعل (Advanced Candu Reactor - ACR700) تصميماً ذا 700 ميغا واط كهربائية، وحتى بوحدة أكبر، 1000 ميغا واط كهربائية (ACR1000)، هي قيد الاقتراح أيضاً. بالإضافة إلى أخذ مَحاسن التصميم ذي الوحدات المُستقلة وطريقة الإنشاء، شملت وحدات (ACR) أيضاً عدداً من تغيرات التصميم الهادفة إلى زيادة الأداء وتخفيض التكاليف. تتضمن هذه استخدام وقود اليورانيوم المخصّب قليلاً لكي يمكن استخدام الماء الخفيف عوضاً عن الماء الثقيل كمبرّد أوّلي، الذي خَفض من مخزون الماء الثقيل المَطلوب بحوالى 75 في المئة (لا يزال الماء الثقيل يُستخدم كوسيط). يَشمل التصميم الجديد أيضاً ضغطاً أعلى للبُخار وحالات فيها درجات أعلى للحرارة، ما يؤدي إلى كفاءة حرارية أعلى مع تخفيض لاحق في تكاليف التشغيل.

هناك أيضاً عدد من تصاميم مفاعلات مَدعوة بالجيل الرابع ما زالت في مراحلها المبكرة جداً من التطوير. إن معظم هذه التصاميم

(*) بدأ التاريخ الفعلي لبناء هذا المفاعل في عام 1973، وهو عبارة عن ثلاثة مفاعلات. وأعطي الترخيص للبدء ببناء المفاعل الثالث في كانون الأول/ديسمبر 2000، على أن يبدأ التاريخ الفعلي لبدء العمل بهذا المفاعل في أيار/مايو 2009، ولكن المشروع تأخر مدة ثلاث سنوات ونصف عن الموعد المحدد، وتخطى الميزانية المرصودة بنسبة 50 في المئة، وتم الاتفاق أخيراً على أن يبدأ العمل به في عام 2013.

تختلف من ناحية المَفهوم عن الأجيال السابقة، وحتى الآن لاتزال عبارة عن تجارب تصميمية بشكل رئيس. مع ذلك تَعد هذه التصاميم بمحاسن كبيرة من ناحية الكفاءة الزائدة وتكاليف التشغيل المنخفضة، وبعضها ربما يكون جاهزاً للتطوير التجاري خلال 20–30 سنة قادمة. قادت وزارة الطاقة الأميركية اتحاداً عالمياً من 10 بلدان في منتدى دولي للجيل الرابع أو (GIF)، وقد ميزت هذه المجموعة ستة أنواع من المفاعلات المتطورة التي يمكن تطويرها في التشغيل التجاري بعد حوالى 30 سنة من الآن (US DOE, 2005). إن هدف هذه المَجموعة هو تطوير مصدر طاقة نووية أكثر استدامة، الذي يقدّم استخداماً أفضل بكثير لمخزونات اليورانيوم المتوافرة، وتوفير أمان أعلى وموثوقية أكبر، مع إنتاج منخفض من النفايات النووية وتكاليف أقل لإنتاج الطاقة. إن الأنواع الستة من المفاعلات المشار إليها من قبل (GIF) في وثيقتها «خارطة الطريق» هي في معظمها تصاميم مفاعلات «سريعة» توافر استخداماً أفضل للوقود، وتستخدم مواد تبريد أولية جديدة مناسبة لنظم درجات حرارة عالية. تتضمن هذه المفاعلات كلاً من تصاميم مفاعلات نوع «لمرة واحدة»، التي تعتمد على انشطار U^{235} لوحده، وتصاميم نوع «الدارة المغلقة» التي تقوم بتَدوير (إعادة استخدام) البلوتونيوم المولّد في المفاعلات السريعة. يَستخدم نظام المفاعل السريع المبرَّد بالغاز دارة وقود مغلقة مع إعادة استخدام البلوتونيوم المتولّد لتخفيض متطلبات اليورانيوم بشكل كبير. من الممكن استخدام الهليوم كمبرّد لإدارة توربين غازي مباشرةً، الذي يَعمل عند درجة حرارة مَدخل حوالى 850 درجة مئوية لتوليد الكهرباء. إن المفاعل السريع المبرّد بالرصاص (Lead Cooled Fast Reactor - LFR) يَستخدم أيضاً دارة وقود مغلقة، لكن بشكل أساسي هو تصميم «ذو سداد مُحكم» (Sealed)، ويتطلب إعادة تزويده بالوقود فقط بعد 10 – 30 سنة. يدور مبرِّد الرصاص بواسطة الحركة الدورانية الطبيعية عِندَ درجة حرارة منخفضة نسبياً حوالى 600 درجة مئوية. تم

تصور المفاعل المبرّد بالرصاص لتوليد الطاقة التوزيعية بحجم يتراوح بين 50 و150 ميغا واط كهربائية للوحدة. أما مفاعل الملح المَصهور (Molten Salt Reactor - MSR) فهو يَعمل بوقود سائل مشكّل من خليط من الصوديوم والزركونيوم وفلورين اليورانيوم، الذي يمرَّر عبر قلب وسيط من الغرافيت. يعمل مفاعل الملح المصهور بضغط منخفض للمبرّد الأوّلي تحت حوالى 5 بار الذي يساهم في التشغيل بأمان، ويتم بعدها نقل الحرارة إلى مبرّد ثانوي لكي تُستَخْدَم في نظام توليد طاقة بدارة رينكين التقليدية. وهناك مفاعل سريع آخر هو المفاعل السريع المبرّد بالصوديوم (Sodium Cooled Fast Reactor - SFR)، الذي يَستخدم وقوداً فلزياً لكنه مبرّد بواسطة سائل الصوديوم الدوّار عند درجة حرارة معتدلة نسبياً حوالى 550 درجة مئوية. أما النظامان الأخيران المعتبران في دراسة (GIF) فهما المفاعل المبرّد بالماء فوق الحرج (Supercritical Water Cooled Reactor - SWCR)، والمفاعل ذو درجة الحرارة العالية جداً (VHTR) الذي يَستخدم الهليوم كمبرّد أولي. يمكن للمفاعل من نوع (SWCR) أن يَعمل إما بدارة وقود مفتوحة أو مغلقة، ومن الممكن أن يَستخدم ماء فوق الضغط الحرج ودرجة الحرارة الحرجة لتحقيق تصميم مُدمَج وفاعل. أما المفاعل من نوع (VHTR) فمن الممكن أن يَستخدم غاز الهليوم لإدارة التوربين الغازي مثل (GFR)، لكن في هذه الحالة فإن درجة حرارة قريبة إلى 1000 درجة مئوية سوف تعزز كفاءة المحطة الإجمالية. هناك نسخة معدلة على المفاعل (VHTR) وهي المَسماة نظام مفاعل «طبقة الحصى» (Pebble-bed)، حيث يمكن استخدام كريات وقود صغيرة مرتبة في تصميم قلب بسيط نسبياً. معظم هذه التصاميم موجودة لغاية الآن فقط كدراسات ورقية، ومن الممكن أن تحتاج إلى تصميم وتطوير كبيرين قبلَ أن تصبح جاهزة لتدخل الخدمة التجارية.

أخيراً، من المَفروض أن نذكر الاندماج النووي بديلاً محتملاً طويل الأمد للمفاعلات الانشطارية التقليدية المستخدمة حالياً،

ومخططاً لها لعقود عدة قادمة. خلال التفاعل الاندماجي، يتم التحام نواتي نظيري الهيدروجين، كالدوتيريوم والتريتيوم، مع بعضهما البعض تحت ضغوطات هائلة ودرجات حرارة تقدّر بملايين الدرجات لتُنتج ذرة الهيليوم ونيوترون عالي الطاقة، وبذلك تحرير كميات كبيرة من الطاقة. إن هذا المصدر من الطاقة هو الذي يزوّد طاقة خَرج كبيرة جداً للشمس، وقد حَلمَ العلماء لعقود في تسخير التفاعل الاندماجي من أجل استخدامه على الأرض. تتضمن الفوائد المحتملة لتطوير محطات الاندماج النووي على الأرض بشكل أساسي، شكلاً لا ينضب من «الوقود» بشكل نظائر الهيدروجين المستخرجة من مياه البحار، وازدياداً في أمان المحطات النووية، وتخفيضاً كبيراً في كمية مواد النفايات المُشعة التي من الممكن إنتاجها. تمَت دراسة الطاقة الاندماجية في المختبرات لسنين عديدة، لكن التحديات الهندسية لبناء مفاعل عملي قادر على احتواء البلازما عند درجات حرارة أعلى بمرات عديدة من درجة انصهار أي مادة معروفة خلال جزء من الثانية، ما زالت حتى الآن من الصعب التغلب عليها. حتى هذا التاريخ، حاول العلماء استخدام إما «الحجز» المغنطيسي الذي يتم فيه استخدام حقل مغنطيسي قوي جداً لاحتواء أنوية الذرّات المُتفاعلة، أو «الحجز» بالقصور الذاتي حيث يتم تركيز شعاعَي ليزر قويين جداً على هدف صغير من الوقود. تم استخدام الحجز المغنطيسي، على شكل جهاز توكاماك (Tokamak) لإنتاج تفاعل نووي اندماجي خلال جزء من الثانية عام 1997، لكن كانت هناك حاجة إلى الطاقة لتغذية الجهاز بطاقة أكبر من التي أُنتجت بواسطة تفاعل الإندماج. كذلك، الطاقة المَطلوبة لليزرَين القويين جداً والمقترَحين للحجز بالقصور الذاتي، من الممكن أن تكون أعلى بعدة مرات من تلك المُنتجة بالتفاعل الاندماجي الحاصل. وهكذا إن الهدف المحيّر هو في تطوير طريقة تزويد تفاعل اندماجي ذاتي الاستمرار بمحصلة طاقة خرج موجبة، التي يمكن بعدئذٍ أن تستخدم لتوليد مصدر مستمر من الكهرباء

أو حامل طاقة آخر كالهيدروجين. إن التحديات العلمية والهندسية للحصول على ذلك صعبة بشكل لا يُصدق، وأي إيضاح ناجح لمحطة اندماج نووي يمكن، إذا حصل ذلك، أن لا يظهر قبل حوالى 50 إلى 100 عام. وبالتالي، لن تكون هناك حكمة في الاعتماد حالياً على تطوير الاندماج النووي كمَصدر عملي للطاقة في المستقبل المتوقع.

8. 6. الطاقة النووية والاستدامة

كما ذكرنا في مقدمة هذا الفصل، يمكن لبعض القراء أن يشكّكوا في اختيار الطاقة النووية كمصدر للطاقة المستدامة. إن فكرة الاستدامة (Sustainability) هي فكرة نسبية، وكنتيجة للقانون الثاني للثيرموديناميك، الذي ينص على أن إجمالي الإنتروبي (Entropy) في الكون هو بازدياد دائم، لا يوجد مثل هذا الشيء بمعنى «استدامة تامة». لقد اخترنا أن نركّز على الطاقة النووية في هذا الفصل لأن استخدامها في توليد الطاقة الكهربائية بدلاً من الوقود الأحفوري هو أحد الطرق الواضحة في تخفيض توليد غازات الدفيئة. كذلك، حتى ولو أن وفرة اليورانيوم ليست من دون حدود، تماماً مثل أي مصدر طبيعي آخر، فإن استخدام مفاعلات من نوع «المُنَسّل أو المُولِّد» (Breeder) يمكن أن يطيل فترة توافر الوقود النووي إلى مئات السنين. وبالتالي، سوف ندرس في هذا الجزء مسائل الاستدامة الرئيسة التي يمكن أن تؤثر في الخطط في الكثير من البلدان لأجل توسيع الطاقة النووية كطريقة للانتقال باتجاه مصدر أكثر استدامة للطاقة. تتضمن هذه المسائل توافر اليورانيوم كوقود طبيعي رئيسي للمحطات النووية، بالإضافة إلى الأمان والانتشار النووي وتخزين النفايات النووية والجوانب المالية لإنتاج الطاقة النووية. أخيراً، سوف ندرس مسألة قبول عامة الناس بالطاقة النووية، وننظر إلى فرنسا «كحالة دراسية» في استخدام الطاقة النووية لتخفيض الطلب على الوقود الأحفوري.

إن «الاحتياطي المثبت» والمعروف حالياً لليورانيوم هو حوالى 3 - 4 مليون طن، وهو كافٍ لتزويد جميع المحطات النووية

الموجودة البالغ عددها حوالى 440 محطة، بالوقود لحوالى الخمسين سنة القادمة. وقد تم التقدير بأنه مع مضاعفة سعر اليورانيوم يمكن ازدياد هذه الفترة إلى حوالى عشر مرات (US DOE, 2005). إن تقدير المخزون لخمسين سنة ضمن الأسعار الحالية يَفترض أن وقود اليورانيوم يستخدم في الجيل الحالي لمحطات الطاقة النووية بنمط «لمرة واحدة»، أو بنمط الدارة المفتوحة، حيث يتم في هذه الحالة استخدام حوالي 0.7 في المئة فقط من اليورانيوم الطبيعي الذي هو على شكل يورانيوم U^{235} الانشطاري. بتعبير آخر، إن أكثر من 99 في المئة من اليورانيوم لم يتم استخدامه، ليصبح أخيراً جزءاً من سيل النفايات المُشعّة التي يجب أن تُخزّن، أو يتم التخلّص منها بطريقة ما. وعلى المدى الطويل، يمكن تحقيق انتقال لبعض تقنيات الجيل الرابع، حيث تستخدم فيه مفاعلات سريعة لتحويل جزء مهم من اليورانيوم U^{238} غير المستخدم إلى نظير بلوتونيوم Pu^{239} وعناصر أكتينيدية (Actinides) مشعّة أخرى قادرة على الخضوع لتفاعلات انشطار نووي. إن استخدام هكذا تصاميم لمفاعل ذي دارة مغلقة، يمكن أن يمدّد بعدئذٍ من توافر الوقود النووي بأكثر من خمسين مرة. هذه العملية، بالإضافة إلى الازدياد المتوقع للاحتياطي المثبت لليورانيوم، سوف تؤدي إلى ازدياد كبير في كمية المواد الانشطارية المتوافرة لتوليد الطاقة الكهربائية. وحتى مع توسعٍ كبير في استخدام الطاقة النووية سوف يكون هناك توفر للوقود النوويٍ لأكثر من 1000 عام، الذي من الممكن أن يُلبّي تعريف الاستدامة لكثير من الناس. في النهاية، حتى هذه المصادر سوف تكون بالطبع غير كافية على المدى الطويل جداً، لكن خلال ذلك الزمن يمكن أن يحصل انتقال طويل الأمد بشكل جيد إلى الطاقة المتجددة كمصدر مطلق ونهائي للطاقة المستدامة.

إن أمَان المَحطات النووية هو حقيقة الشغل الشاغل لكلٍّ من عامة الناس ولمشغّلي هذه المحطات. لقد حصل حادثان خطيران

خلال تشغيل المحطات النووية، أدى كلاهما إلى ضرر شديد في القلب النووي والذي يعبَّر عنه عادةً بحادث «فقدان المبرّد». حيث إن فقدان سائل التبريد من أي مفاعل نووي لا يزيل فقط قابلية الحفاظ على درجة حرارة قلب المفاعل ضمن الحدود التصميمية فقط، لكن عادةً يزيل أيضاً أحد عناصر التحكم الرئيسة المطلوبة للحفاظ على تشغيل مستقر. حصل **أول** حادث عام 1979 في محطة «ثري مايل آيلاند» (Three Mile Island plant)، المشغّلة من قبل شركة ميتروبوليتان إديسون (Metropolitan Edison) في هاريسبوغ بنسلفانيا في الولايات المتحدة الأميركية (Merilo, 1980). في هذه الحادثة حصل ضرر شديد لقلب المفاعل نتيجة حالة تقليدية من سلسلة أعطال ميكانيكية ثانوية نسبياً، مركّبةً مع استجابة تشغيل غير مناسبة. كانت الوحدة الثانية في جزيرة «ثري مايل آيلاند» ذات تصميم تقليدي من نوع مفاعل الماء المضغوط (PWR) حيث استخدم ماء ذو ضغط عالٍ كمبرّد أوّلي يتم تمريره عبر قلب المُفاعل لإزالة الحرارة، ونقلها بعدئذٍ إلى مبرّد ثانوي في سلسلة من المبادلات الحرارية، أو «المولّدات البخارية» المستخدمة لإنتاج البخار المطلوب لإدارة المولّد التوربيني. إن جميع المُبرّدات الأولية والثانوية في مفاعلات الماء الخفيف، كتصميم مفاعل الماء المضغوط، هي مياه عادية. وتتم المحافظة على ضغط المبرّد الأوّلي عند 150 بار تقريباً، وبذلك لا يغلي هذا الماء ويحافظ على فاعليّته كمبرّد ووسيط، بينما تتم المحافظة على المبرّد الثانوي عند ضغط أقل لكي يغلي وينتج بخاراً مناسباً لإدارة التوربين. وإذا كان هناك أي فقدان مهم لكلٍ من المبرّد الأوّلي أو الثانوي خلال تشغيل المفاعل، فإن ذلك سوف يؤدي إلى تخفيض قابلية إزالة الحرارة من قلب المفاعل، ما يَستدعي بالضرورة توقيف المفاعل بسرعة وبشكل مُتحكّم به. تشمل جميع تصاميم المفاعلات مراقبة معقدة للأمان ونظام التحكم اللذين صمّما لتأمين توقّف أوتوماتيكي للمفاعل في حال أي فقدان أساسي للمبرّد.

في صباح 28 آذار/مارس 1979، تم إنجاز بعض أعمال الصيانة الروتينية على وحدة مصفّي ناتج التكثيف الذي يَنزع الشوائب من البخار المُكثّف، وبذلك يمكن استخدامه ثانيةً في المحطة. كان عامل الصيانة يستخدم الهواء المضغوط ليحاول إزالة انسداد في أنبوب ماء ضيق. ونتيجة ذلك، تم إجبار الماء على الرجوع إلى النظام الهوائي خلف صمّام فحص التسريب، ليَدخل في نهاية الأمر إلى النظام الهوائي لعناصر التحكّم الذي يُستخدم لتشغيل صمّامات عديدة. بسبب هذا التلوّث للنظام الهوائي، حصلت عمليات تحكم عدة غير مُخطط لها، ما أدى إلى تفعيل نظام أمان المفاعل ليبدأ بإيقاف المفاعل أوتوماتيكياً. تتضمن هذه الإجراءات تشغيل سلسلة من مضخات التزوّد بالماء في حالة الطوارئ التي صُمّمت لتأمين مصدر إضافي لإزالة الحرارة للمحافظة على درجة حرارة قلب المفاعل ضمن الحدود الطبيعية. عادةً، تنتهي هذه الحالة ككثير من الحوادث الثانوية الأخرى، بتوقف كلي للمحطة، مُتحكماً بها أوتوماتيكياً بواسطة نظام أمان المفاعل. وفي هذه الحالة، تم ترك سلسلة من صمامات «الإغلاق» مغلقة من دون اهتمام، وبالتالي لم يكن هناك من إمكانية لضخ مياه التزوّد في حالة الطوارئ إلى نظام المبرّد الثانوي. وبسبب فقدان المبرّد عند الطرف الثانوي لم يكن هناك من طريقة لإزالة الحرارة من المبرّد الأوّلي، ما جعل درجة حرارته تزداد، وبالتالي يزداد ضغطه إلى مُستوى تسبب في فتح صمام الأمان. للأسف، فشلَ هذا الصمام في الإغلاق مجدداً عندما انخفض ضغط المبرّد الأوّلي، ما أدى إلى فقدان معظم المبرّد الأوّلي. كذلك، بما أن هذا المبرّد بدأ بالغليان، بَقي الضغط عالياً، جاعلاً مُشغّلي المحطة يعتقدون بالخطأ أن هناك مبرّداً أوّلياً أكثر في النظام مما هو بالفعل عادةً. الأمر الذي دفعهم إلى أن يتدخلوا يدوياً لتخفيض جريان مبرّد الطوارئ الذي كان قد بدأ أوتوماتيكياً، وأدى ذلك مع فشل صمام استعادة الضغط في الإغلاق إلى انصهار جزئي لقلب المفاعل في حادث «فقدان - مبرّد» كلاسيكي. لحسن الحظ، لم يكن

هناك فقدان للأرواح نتيجة الحادث في جزيرة «ثري مايل آيلاند»، وتم تعلّم دروس عديدة حول كل من تصميم «الفشل بأمان»، وحول تدريب المُشغّلين.

في النتيجة، إن تصاميم مفاعل الجيل الثالث هي بالأساس أكثر أماناً من التصاميم التي سبقتها، وتم توسيع تدريب المُشغّلين لضَمان عدم توقف أنظمة الأمان خلال إجراءات التوقف الأوتوماتيكي. من المُحتمل، أن الدرس الأكثر أهمية الذي تم تعلمه هو أن تصميم الأنظمة الهندسية المعقدة يمكن أن يُجعل آمناً إما من الفشل الميكانيكي، أو من خطأ المُشغّل البشري، لكن عادةً ليس من كليهما معاً.

أما **الثاني**، وهو الحادث الأكثر خطورة بكثير، حصل عام 1986 في تشرنوبل (Chernobyl)، قرب كييف (Kiev) في أوكرانيا، التي كانت سابقاً جزءاً من الاتحاد السوفياتي. كان المفاعل في تشرنوبل من نوع (RBMK)، وهو مفاعل من نوع ماء مغلي، لكنه يَستخدم الغرافيت كوسيط عوضاً عن الماء كما في تصميم مفاعل الماء المغلي (BWR) المستخدم في بلاد أخرى. وهذا النوع من التصميم يمكن أن يؤدي إلى تشغيل غير مستقر خلال بعض الظروف التشغيلية، حيث إن وظيفة الوسيط مفصولة عن وظيفة المُبرّد. يتم في المفاعل الذي هو من نوع الماء المغلي ذي التصميم المخصص «لمرة واحدة»، توليد البخار مباشرةً في قلب المفاعل، بشكلٍ غير مشابه لنظام مفاعل الماء المضغوط (PWR) الذي يتم فيه الحفاظ على ماء عالي الضغط دائماً في طور سائل كمُبرّد أوّلي، وبعدئذٍ تُنقل الحرارة إلى مُبرّد ثانوي، كما رأينا في محطة «ثري مايل آيلاند». هناك مشكلة أساسية محتملة مع تصميم مفاعل الماء المغلي (BWR) وهي أن تشكّل البخار الإضافي في القلب يمكن أن يُخفِّض إمكانية إزالة الحرارة بسبب وجود جزء كبير من البخار. في مفاعل ماء مغلي تقليدي يستعمل الماء كوسيط. ووجود جزء أكبر من بخار المَاء في القلب يخفّض أيضاً من فاعلية الماء كوسيط، ما يؤدي إلى تبريد

منخَفض للقلب مترافقاً مع انخفاض في قدرة الخرج، مؤدياً بالتالي إلى تشغيل مستقر. ولكن، في تصميم (RBMK)، لا يترافق التشكل الإضافي للبخار مع تخفيض في فاعلية وسيط المفاعل، وبذلك إن أي تخفيض في المقدرة التبريدية ومقدرة الوسيط الإجمالية من المحتمل أن تؤدي إلى تشغيل غير مستقر. يعتمد تصميم (RBMK) على سلسلة من قضبان التحكم، التي تتكوّن من مواد ماصّة للنترونات من أجل التحكم بالتفاعل النووي والمحافظة على استقرار المفاعل. خلال الفترة من 25 إلى 26 نيسان/أبريل عام 1986 كانت الوحدة الرابعة لتشرنوبل، لا تزال تعمل خلال سلسلة من اختبارات الأمان، بشكلٍ يَدعو إلى السخرية، حيث كان مُستخدماً فيها عدد أقل من العددٍ الطبيعي لقضبان التحكم، وكان مَصدر ماء التبريد لحالة الطوارئ غير مُشَغّل. خلالَ أَحد هذه الاختبارات أَصبح المفاعل غير مستقر بشكلٍ كبير وسَبّبت ذروة العمل في التفاعل إنتاجاً زائداً للبخار، مؤدياً ذلك إلى تشقق القلب. وأدّى تشقق القلب إلى إضرام النار في الوسيط الغرافيتي، وبسبب غياب بناء الاحتواء ذي الجدران السميكة، تمَ انبعاث غازات ذات درجة عالية من الإشعاع التي نُقلت حول العالم بواسطة الرياح السائدة.

للأسف، تم فقدان حوالى 30 ضحية، كنتيجة مباشرة لانفجار المفاعل واندلاع النيران في تشرنوبل، أو بسبب التسمم الإشعاعي مباشرة بعد ذلك. وعلى الرغم من إجراء دراسات عديدة عن التأثيرات الصحية الطويلة الأمد لحادث تشرنوبل، ومع وجود دَليل واضح بأن الآلاف من الناس تلقوا جرعات زائدة من الإشعاع، يبدو أنه لا يوجد هناك إجماع حول عدد الضحايا الذين يمكن أن يكونوا في النهاية قد تأثّروا بالكارثة. هناك ملحق لتقرير أعدته الهيئة العلمية للأمم المتحدة على تأثيرات الإشعاع الذري عام 2000، حيث تم التعليق على التأثيرات الطويلة الأمد لحادث تشرنوبل (UNSCEAR, 2000)، والذي يُستخلص جزئياً منه:

أخيراً، يجب التأكيد أنه على الرغم من أن هؤلاء الذين تعرّضوا للإشعاع كالأطفال، وعمال الطوارئ وعمال استعادة التشغيل، هم في حالة خطورة زائدة من التأثيرات المستحثة بالإشعاع، وإن الأغلبية الكبيرة من عدد السكان لا تحتاج إلى العيش في خوف من العواقب الصحية الخطيرة لحادث تشرنوبل. إن الجزء الكبير كان معرضاً لمستويات إشعاعية مساوية إلى تلك المُستويات الطبيعية، أو أعلى بمرات قليلة منها، وإن التعرضات المُستقبلية ستنخفض مع اضمحلال الإشعاع لدى المواد المشعة المترسّبة. لقد تعطلت الحياة بواسطة حادث تشرنوبل، لكن من ناحية المنظور الإشعاعي، وبالاعتماد على فحوصات هذا المُلحق، هناك نظرة ايجابية عامة بالنسبة إلى مستقبل صحة مُعظم الأفراد التي من المفروض أن تسود.

لا يوجد شك في أن لهذا الحادث الرئيس صدى عالمياً بالنسبة إلى مجمل القطاع الصناعي النووي، وليس للاتحاد السوفياتي فقط. كذلك أدى إلى مساعٍ مجددة لتقدير المخاطر المترافقة مع تطوير الطاقة النووية، وفيٍ النهاية لتبني أفكار تصميمية ذات أمان أكبر وتعزيز معايير الأمان في كل العالم. وكما هو الحال مع أي تكنولوجيا، سوف يكون هناك حوادث لا مناص منها، وفي النهاية إن مخاطر تطوير الطاقة النووية يجب أن تُحَكِّم لمقارنةً بالفوائد المحتملة للبشرية عندما تتزود بمصدر ضخم للكهرباء بسعر معقول ومن دون توليد غازات الدفيئة.

إن احتمال الانتشار النووي، حيث تستخدم المواد النووية من قبل بلدان في حالة عداء لتطوير أسلحة نووية، أو بنقلها إلى منظمات إرهابية، يجعلنا نحتاج أيضاً إلى التعامل مع هذا الانتشار بعمق. سوف تتطلب هذه التهديدات للمُجتمع فحصاً دقيقاً للتوفيق بين الاستعمال الخاطئ المُحتمل للمواد النووية وفوائد الكهرباء المُولّدة نووياً. ونحتاج إلى أن ندرك أن «الأمر بعيد عن السيطرة» وأن المواد

النووية التي من المُحتمل أن تكون خطيرة سوف تكون مُتوافرة لأحد ما يريدها بإلحاح كافٍ، في حال توسع الاستخدام السلمي للطاقة النووية أم لا. يَبدو من المحتمل أنه سوف يوجد دائماً عناصر مارقة ترغب في استخدام أي تكنولوجيا كوسائط لفرض إرادتها على الآخرين، سواء كانت هذه الوسائط على شكل بارود، أو سموم كيميائية، أو مواد نووية. ولصنع رأس نووي، يَتطلب ذلك الوصول إلى يورانيوم عالي التخصيب وإلى تجهيزات تصنيع معقدة، ومن غير المتوقع الحصول على هذه التقنيات حتى بواسطة مجموعات إرهابية متطورة عاقدة العزم على ذلك. غير أنه يمكن الحصول على النفايات النووية عند بعض المراحل في المستقبل، إما من مصادر السوق السوداء، أو بالطبع حتى مباشرة من الدول المعادية التي طوّرت مسبقاً قوة نووية كفؤة. ومن المحتمل أنه يمكن استخدام هذه المواد لتصنيع ما يسمّى «القنبلة المُلوّثة» التي لن تؤدي فعلياً إلى انفجار نووي، ولكنها سوف تستخدم متفجرات تقليدية لتوزيع مادة نشطة شعاعياً في منطقة آهلة بالسكان. يمكن أن تكون نتائج مثل هذا الهجوم مشابهة لتلك الناتجة من انبعاث غازات عالية السمّية في مناطق محصورة، ما يشكّل تهديداً إرهابياً آخر متوقعاً، ويتطلب فقط خبرة منخفضة التقنية نسبياً. وللحماية ضد هذه الاحتمالات نحتاج دائماً إلى أن نكون يقظين، وهناك حاجة إلى تقوية وكالات دولية كوكالة الطاقة الذرية الدولية، وازدياد في التعاون الدولي لضمان المُراقبة الحريصة لكل مواد النفايات النووية، بحيث إن التكنولوجيا التي هي مفيدة للكثيرين لن تستخدم بشكل سيئ من أجل مصلحة البعض.

إن التخرين و/أو التخلّص الطويل الأمد من مواد النفايات النووية ما زال موضوعاً قيد التعامل معه من قِبل بلدان عديدة تقوم بتشغيل محطات نووية. بسبب الكمية القليلة للوقود النووي المطلوبة لتوليد كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية، فإن كمية النفايات الناتجة

هي أيضاً صغيرة جداً. مثلاً، إن كمية الوقود المُستهلكة في مفاعل 1000 ميغا واط كهربائية يعمل لمدة سنة يُقدّر بحوالى 25 - 30 طن. إن معظم مواد النفايات الناتجة من المحطات النووية التجارية يتم تخزينها في موقع كل محطة نفسه، إلى يومنا هذا. وعندما تتم إعادة تزويد مُفاعل نووي بالوقود، عادةً خلال الإغلاق السنوي للمحطة أو بشكلٍ مستمر طالما تعمل المَحطة كما في حالة مفاعلات (CANDU)، تتم إزالة عناصر الوقود النووي المستهلَك وتخزينها في وعاء مفتوح من الماء مشابهاً لحوض سباحة كبير. يُوفِّر الماء درعاً طبيعياً من الإشعاع، ويخدم أيضاً بإزالة أي حرارة يمكن أن تبقى مُتولدة من عناصر الوقود المُستخدمة. على الرغم من أن هذا النوع من التَخزين هو كافٍ لاحتواء جميع النفايات المُنتجة تقريباً خلال حوالى خمسين سنة من تشغيل المحطة النووية، فإن المطلوب إيجاد شكل أكثر ديمومة للتخلّص من النفايات. تُصنف عادةً مواد النفايات النووية كنفايات مُستوى مُنخفض أو مُستوى مُتوسط أو مُستوى عالٍ. يحتوي الوقود النووي المُستهلك في المفاعل على مجال كبير من المواد المُشعّة، بأنصاف عمر (الزمن الذي تنخفض فيه النشاطات الإشعاعية إلى نصف مستواها الأوّلي) تتراوح بين بضع ثوان وملايين السنين. في بعض الحالات، كما رأينا، يمكن إعادة معالجة الوقود المُستهلَك لاستخراج المادة القابلة للانشطار كالبلوتونيوم Pu^{239}، وفي هذه الحالة هناك فقط حوالى 3 في المئة من الوقود الأصلي يبقى كنفايات مستوى عالٍ محتويةً على مخلفات انشطار شعاعية، بعضها ذات أنصاف عمر طويلة جداً. في هذه الحالة يتم أولاً تبخير النفايات التي هي على الأغلب سائلة ذات مستوى عالٍ، والباقي الذي هو مواد صلبة يُضاف بعدئذٍ إلى زجاج البوروسيليكات المُنصهر ويُبرّد إلى مادة زجاجية صلبة. بعدئذٍ تُصبح هذه النفايات المُزجَّجة جاهزة من أجل توضيبها النهائي في علب التخزين من أجل التخلّص منها، أو تخزينها الطويل الأمد. إذا لم تتم إعادة المُعالجة للوقود المُستهلك،

كما هي حال جميع النفايات النووية التجارية في الولايات المتحدة وكندا، مثلاً، عندئذٍ يتم التعامل مع إجمالي الوقود المُستهلك كنفايات ذات مُستوى عالٍ، ويجب في النهاية التخلّص منها في ما يُعرف بِخَيار «التخلص المُباشر».

وعلى مدى السنين، تمَ اقتراح العديد من تقنيات مختلفة للتخزين الطويل الأمد لمواد النفايات النووية. تتضمن هذه الاقتراحات التخلّص من النفايات بوضعها في المحيطات العميقة، والتخزين تحت الأرض في طبقات مُستقرة جيولوجياً، وحتى إنه تَمَ التطرق إلى ترحيل حاويات النفايات إلى الفضاء البعيد باستخدام الصواريخ والمَركبات الفضائية الموجودة حالياً ولكنها مُكلفة. حتى الآن، يبدو أن الاتفاق الدولي يدور حول طريقة أكثر أماناً وأكثر اقتصاديةً للتخّلص من النفايات، والتي سوف تكون طريقة التخزين لنفايات المُستوى العالي عميقاً تحت الأرض في طبقات مُستقرة جيولوجياً كالتشكيلات الصخرية أو الترسبات الملحية. أَعلنت كلٌ من الولايات المتحدة وفنلندا خططاً من أجل التخلّص من النفايات النووية ذات المستوى العالي في الطبقات الجيولوجية العميقة. في عام 2001 وافق البرلمان الفنلندي على بناء منشآت تحت الأرض للتخلّص من النفايات في أوراجوكي (Eurajoki) والتي سوف تكون قادرة على تخزين حوالى 2500 طن من النفايات النووية المُغلفة (World Nuclear Association, 2005). تُشكل هذه الكمية النفايات ذات المستوى العالي التي سوف يتم انتاجها بواسطة المفاعلات الفنلندية الأربعة العاملة خلال فترة 40 سنة. وسوف تكون هذه المستودعات تحت الأرض على عمق حوالى 500 متر، وسوف تصمّم بحيث يمكن استعادة مستوعبات النفايات بعد زمن مُعيّن في المُستقبل إذا اعتُبر ذلك مرغوباً. يخضع المكان حالياً لاستقصاءات دقيقة جداً، من ضمنها اختبار وتصنيف للمادة الصخرية، ومن المتوقع أن تكون في حالة تشغيل عام 2020. وقد تم تقدير الكلفة الطويلة الأمد المُقدّرة لإدارة النفايات، من ضمنها تخزين

النفايات وتفكيك المنشأة، بحوالى 10 في المئة من إجمالي كلفة توليد الكهرباء نووياً. في الولايات المتحدة، اختارت وزارة الطاقة جبل يوكا (Yucca) في نيفادا كأول موقع تخزين دائم للنفايات النووية ذات المستوى العالي. وفي عام 2002، وافق الكونغرس الأميركي على تطوير جبل يوكا كمستودع نفايات نووية بعد حوالى 20 سنة من الدراسات العلمية، وإن التفاصيل الهندسية هي الآن في طريقها إلى تطوير المنشأة. تم اختيار هذا الموقع بسبب مكانه البعيد في منطقة جافة جداً ومُستقرة جيولوجياً، تَشمل بشكل رئيس صخوراً بركانية دُعيت (Tuff) التي ترسبت منذ حوالى 12 مليون سنة. سوف يتم تخزين مواد النفايات في سلسلة من الأنفاق حوالى 200 إلى 500 متر تحت السطح، وحوالى 300 متر فوق مستوى المياه. سوف يتم تصميم المُستودع تحت الأرض بحيث يمكن إما إغلاق الأنفاق وختمها بشكل دائم، أو تركها مَفتوحة لتسمح بالوصول إلى النفايات من قبل أجيال المُستقبل إذا بدا ذلك مرغوباً. يشير المُخطط الزمني الحالي إلى إنشاء مُستودعات النفايات النووية في جبل يوكا، بأن المُنشأة سوف تكون جاهزة لاستقبال النفايات النووية عام 2010 (US DOE- EIA, 2005).

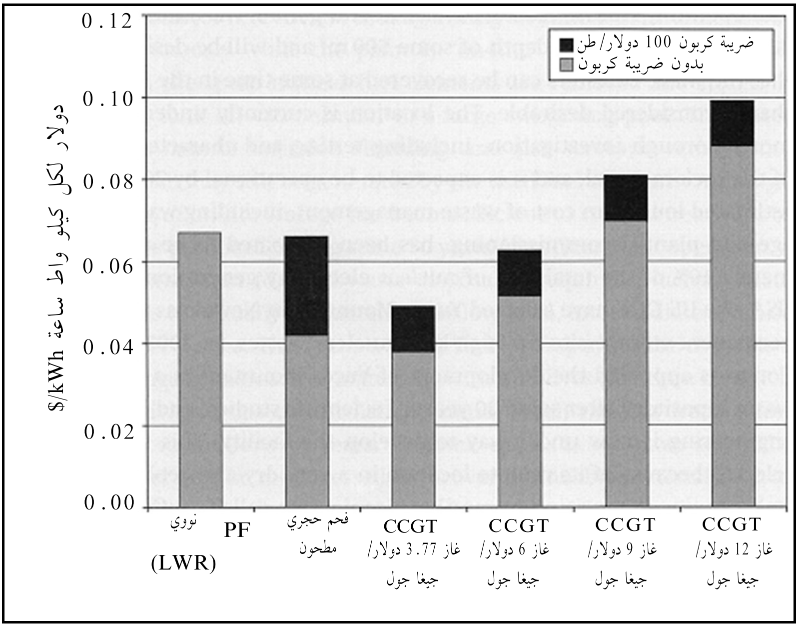
8. 7. الجوانب الاقتصادية للطاقة النووية وموافقة العامة

تَظهر غالباً تكاليف الطاقة النووية كعائق لتوسيع استخدامها في توليد الكهرباء. إن عنصر الكلفة الرئيس للكهرباء المُولّدة نووياً هو كلفة إنشاء المحطة، حيث إن المَطلوب هو القليل من الوقود، وكُلفته صغيرة نسبياً. تم الشروع بدراسة شاملة لتكاليف الطاقة النووية مقارنةً بكلٍّ من مَحطات الفحم الحجري التقليدية ومحطات الدارة المُركّبة التي تَعمل على الغاز الطبيعي، من قبل مجموعة مُتعددة المجالات في معهد ماساشوستس (MIT)، ونشرت في عام 2003 (MIT, 2003). إن افتراضات القاعدة الأساسية في هذه الدراسة كانت تكاليف إنشاء حوالى 1300 دولار لكل كيلو واط كهربائية لمحطة

فحم حجري جديدة تعمل على الفحم الحجري المطحون (PF)، و500 دولار لكل كيلو واط كهربائية لمحطة توربين غازي ذات دارة مركبة (CCGT)، و2000 دولار لكل كيلو واط كهربائية لمحطة نووية بمُفاعل ماء خفيف (LWR). تم تقدير الكلفة الإجمالية (تشغيل وصيانة) للكهرباء من محطة نووية، مُتضمناً الوقود، بحوالى 0,015 دولاراً للكيلو واط ساعة، بينما قُدرت كلفة الوقود لوحده بحوالي 2.1 دولار/ جيغا جول لمحطة فحم حجري مطحون.

أما بالنسبة إلى محطة غاز طبيعي ذات دارة مركبة (CCGT)، فافترضت كلفة الغاز ضمن مجال يتراوح بين حد أدنى 3.77 دولار/ جيغا جول إلى حد أعلى 6.72 دولار/ جيغا جول. تم ذلك مع افتراض سيناريو قاعدة أساسية بزمن تشغيل 40 سنة، ومُعامل إنتاج 85 في المئة لجميع المحطات. أدت هذه البيانات إلى كلفة إجمالية مُقدرة للكهرباء من القاعدة الأساسية للمحطة النووية بحوالى 0.067 دولار للكيلو واط ساعة، بينما كانت 0.042 دولار للكيلو واط ساعة لمحطة فحم حجري مطحون، وما بين 0.038 و0.056 دولار للكيلو واط ساعة لمحطة (CCGT). من الواضح، ضمن هذه الظروف لم تكن المحطة النووية مُنافسة اقتصادياً بالمُقارنة مع محطات الفحم الحجري والمحطات الغازية (CCGT)، واتضح لماذا تعمل مُعظم المحطات المطلوبة تجارياً في السنوات الأخيرة إما على الغاز أو على الفحم. وبما أن هذه الدراسة نُشرت في عام 2003، فإن كلفة الغاز الطبيعي ارتفعت الآن، لتصل الأسعار إلى 12 دولار/ جيغا جول في 2005، وإن التكاليف البيئية المُترافقة مع انبعاثات غازات الدفيئة الكبيرة من محطتي الفحم الحجري والغاز قد أصبحت تحت تدقيق زائد.

إن نتائج الكلفة التقديرية للكهرباء من محطة نووية بالمُقارنة مع كل من محطة فحم حجري مطحون (PF) ومحطة غازية (CCGT) مُوضحة بالشكل (8-4)، وهي صادرة عن دراسة أعدها معهد



الشكل (8-4): تقدير معهد ماساشوستس للتكنولوجيا MIT لتكاليف الكهرباء.

المصدر: Massachusetts Institute of Technology (MIT), *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study*.

ماساشوستس (MIT). من أجل حالات (CCGT)، هُناك مجال من تكاليف الغاز يتراوح بين كلفة دنيا 3.77 دولار للجيغا جول المُفترضة في الدراسة، إلى قيم أكثر واقعية مُمثلة لأسعار الغاز على مدى السنتين الأخيرتين. تم تقدير تكاليف الكهرباء من محطة (CCGT) باستخدام الكلفة الأعلى للغاز المُستخرجة من التكاليف المُفترضة في دراسة معهد ماساشوستس. كذلك يبيّن الشكل (8-4) الكلفة الإضافية للكهرباء من جميع محطات الوقود الأحفوري إذا فُرضت ضريبة كربون 100 دولار/ طن من الكربون. مع افتراض ضريبة من هذا النوع على الكربون، أو جباية بعض الضرائب المُكافئة، تُصبح كلفة طاقة الفحم مُكافئة لتلك الطاقة المُولّدة من المحطة النووية، بينما تُصبح كلفة طاقة الغاز باستخدام أسعار الغاز

الطبيعي المُجربة في عام 2005 أكثر ارتفاعاً من الطاقة التي تأتي من المحطة النووية. ضمن أي سيناريو مشابه، مع تصاعد تكاليف الوقود الأحفوري والقلق المُتزايد حول انبعاثات غازات الدفيئة، تَبْدو الطاقة النووية خياراً مناسباً. في النهاية، إن القرارات المَطلوبة حول توسيع إنتاج الطاقة النووية أو عدم توسيعه، لن تكون بشكل محتوم اقتصادية وفنية فقط، لكن أيضاً سياسية بطبيعتها.

إن قبول الناس بالطاقة النووية قد تغير بالطبع على مدى العقود منذ أن ظهرت أولاً في خمسينيات القرن الماضي. في البداية كان مُرحباً بالطاقة النووية كثيراً كمصدر جديد لا يَنضب وغير مُكلف للكهرباء. بعدئذٍ، في الثمانينيات والتسعينيات من القرن الماضي، إثر عَواقب حادثتي جزيرة «ثري مايل آيلاند» و«تشرنوبل»، نزلت إلى مستوى غير مرغوب في معظم البلدان. كان ذلك مرتبط بازدياد الكلفة العالية جداً التي غالباً ما تظهر كنتيجة لتغيرات التصاميم المستمرة التي تصبح ضرورية بسبب اهتمامات الأمان المُتصاعدة في ظل التصميم والبناء للمحطات الجديدة خلال هذا الزمن. خلال تسعينيات القرن الماضي كان هناك تشييدات قليلة جداً لمحطات نووية جديدة في العالم الغربي، على الرغم من أنه تم التخطيط لمَحطات جديدة وتم بناؤها في مَناطق الاقتصاد النامي بِسرعة، كالصين والهند وجنوب كوريا. وخلال فترة الخمسين سنة منذ أن أصبحت أول محطة نووية قيد التشغيل، وقفت فرنسا كأول دولة يبدو فيها أن هناك قبولاً كبيراً للطاقة النووية. وإذا كانت الطاقة النووية اليوم مصدراً أوّلياً للطاقة لحوالى 17 في المئة من توليد الكهرباء بالعالم، فهي تشكل حوالى 80 في المئة من إجمالي الكهرباء المُولّدة في فرنسا، وهو جزء أكبر بكثير مما هو في أي بلد آخر. هذا التطوير الكبير للطاقة النووية ما زال مستمراً، وإن ظَهر على ما يَبدو قليل من الاهتمام لإيقاف بناء المَحطات النووية الذي حصل في مُعظم ما تبقى من العالم الغربي. وهكذا، يبدو السؤال طبيعياً وهو: لماذا لا تتماشى فرنسا مع كثير

من بلدان العالم في ما يتعلق بتطوير الطاقة النووية خلال العقدين الأخيرين. إذ اختارت الحكومات الفرنسية المُتتالية الاستثمار في الطاقة النووية بوضوح من خلال شركة الكهرباء الفرنسية الحكومية (EDF)، جزئياً بسبب القلق حول أمن مخزون الطاقة وجزئياً أيضاً بسبب التأثيرات البيئية الناتجة من حرق الوقود الأحفوري لتوليد الكهرباء. إن الانتشار الكبير لقبول العامة بمثل هذه الاستراتيجية قد أَبعد في ما يبدو ردة فعل الناس في مُعظم البلاد الغربية الأخرى، وقد تم شرح ذلك في كتاب **إشعاعية فرنسا** *The Radiance of France* بواسطة عالمة الاجتماع غابرييل هيشت (Gabrielle Hecht). في هذا الكتاب، تَشرح المؤلفة أن الرأي الإيجابي بالنسبة إلى الطاقة النووية المتخذ من قبل الشعب الفرنسي هو على الأغلب عائد إلى البنية الاجتماعية المُتماسكة لاتحادية البلد والنُخب البيروقراطية. إن كثيراً من مُتخذي القرار الأساسيين، سواء كانوا في القطاعات الصناعية الضخمة التي تصمم وتبني محطات الطاقة النووية، أو في الأقسام الحكومية المعنية، هم خريجون من جامعات النخبة في فرنسا، وإن عامة الناس مُعجبون كثيراً بمثل هؤلاء الخريجين. وتُناقش مؤلفة الكتاب أن هذا هو السبب الرئيس وراء قبول الطاقة النووية بشكل كبير، مع عدم قبول قليل جداً من قبل الإعلام الوطني أو الأحزاب المُعارضة. وإذا كان هذا هو التمثيل الدقيق والتام للحالة في فرنسا، فهذا يمكن أن يكون عرضةً للسؤال، لكنه بالتأكيد يُوضح الحقيقة القائلة إن رأي العامة في مثل هذه الأسئلة المهمة عن سياسة الطاقة هو غالباً محدّد بعوامل مُختلفة عن المَسائل الفنية والاقتصادية إلى حد بعيد.

المراجع

Books

Hecht, Gabrielle. *The Radiance of France: Nuclear Power and National Identity after World War II*. Boston, MA: MIT Press, 1998. (Inside Technology)

Hore-Lacy, Ian. *Nuclear Electricity*. 7th ed. Melbourne: Uranium Information Centre; London: World Nuclear Association, 2003.
Massachusetts Institute of Technology (MIT). *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study*. Boston, MA: MIT Press, 2003.

Conferences

Merilo, M. «Up the Learning Curve for Reactor Safety: The Accident at Three Mile Island.» Paper presented at: The 1st Annual Canadian Nuclear Society Conference, Montreal, June 1980.

Reports

US Department of Energy (2002). «A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems.» Report GIF-002-00.
UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000). Report Annex J.

Websites

Atomic Energy of Canada Ltd. (2005). <http://www.aecl.ca/>.
Framatome (2005). <http://www.framatome.com/>.
General Electric Company (2005). <http://www.gepower.com/prod_-serv/products/nuclear/en/index.htm>.
US Department of Energy. Energy Information Agency (2005). <http://www.eia.doe.gov/fuelnuclear.html>.
US Nuclear Regulatory Commission (2006). <http://www.nrc.gov-Westinghouse Electric company (2005). http://www.ap1000.-westinghousenuclear.com>.
World Nuclear Association (2005). "Nuclear Energy in Finland." <http://www.world-nuclear.org/info/inf76.htm>.

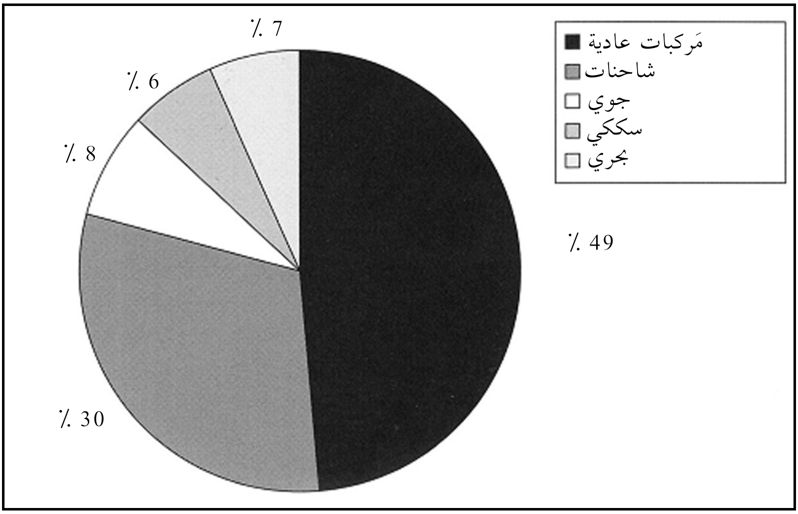
القسم الرابع

نحو توازن طاقة مُستدامة

9 ـ تحدي مسألة النقل

9. 1. استخدام طاقة النقل

يُشكل قطاع النقل أعلى من الربع بقليل من إجمالي الطلب على الطاقة، كما رأينا في الفصل الرابع. مع تزايد «العولمة» والثروة المُتزايدة بسرعة في البُلدان الكثيفة السكان، مثل الصين والهند، فإنه من المُتوقع أن يزداد في هذا القرن الجزء المُخصص لقطاع النقل من مجمل مصادر الطاقة. ويمكن أن يُقسم الطلب على الطاقة في قطاع النقل بشكل رئيس بين الطلب على النقل الهادف إلى نقل الناس، وإلى ذلك الهادف إلى نقل المواد والإمدادات أو «البضائع». يمكن أيضاً القيام بتقسيم آخر للطلب على الطاقة بين أنماط النقل الأساسية: النقل البري، والنقل البحري، والنقل الجوي. تم تقدير التجزيء في الطلب على طاقة النقل عالمياً بشكلٍ نمطي بواسطة جمعية الطاقة العالمية (WEC)، وهذا مُبين في الشكلً (9–1) (World Energy Council, 2005). تتضمن هذه البيانات نقل كل من البضائع والناس عالمياً عام 1995. هناك 80 في المئة تقريباً من مجمل الطلب على النقل يَنتج من النقل البري، مع أقل بقليل من 50 في المئة من إجمالي الطلب يستخدم في تَزويد النقل الشخصي في المَركبات العادية. وتم تقسيم نسبة الـ20 في المئة الباقية من إجمالي الطلب على طاقة النقل بالتساوي تقريباً بين النقل الجوي والسككي والبحري. يتم اشتقاق معظم الطاقة المستخدمة في قطاع النقل تقريباً من النفط الخام على شكل وقود البنزين والديزل في النقل البري، ووقود الطائرات النفاثة في النقل الجوي، ووقود الديزل والزيت النفطي الثقيل



الشكل (9-1): الطلب على طاقة النقل عالمياً بحسب النوع - 1995.

المصدر: مبني على بيانات من بيان لجمعية الطاقة العالمية 2000: Energy for Tomorrow's World - Acting Now!

في النقل البحري. أما الاستثناء الوحيد لذلك فهو استخدام الكهرباء في بعض قطاعات النقل الحديدية، بشكل رئيس في مناطق ذات كثافات سكانية مثل أوروبا واليابان. توقعت أيضاً (WEC) أن إجمالي الطلب على طاقة النقل سوف ينمو حوالى 55 في المئة خلال الفترة بين عامي 1995 و2020.

إن وقود النفط السائل يناسب بشكل مثالي تطبيقات النقل بسبب كثافة الطاقة العالية المُترافقة مع هذا النوع من الوقود، وسهولة نقله وتخزينه. لقد وصل محرك الاحتراق الداخلي إلى مُستوى عالٍ من التطور، ويستخدم الآن في جميع الأحوال والأمكنة تقريباً كمصدر قدرة بالنسبة إلى المركبات البرية كلها. أما بالنسبة إلى الطائرات، فهناك حاجة من أجل أكبر قدر ممكن من نسبة القدرة إلى الوزن، وإن المُحرك التوربيني الغازي الذي يعمل إما كمحرك طائرة نفاثة فقط، أو كمحرك مروحي توربيني، هو مناسب ومثالي لهذه التطبيقات بالنسبة إلى جميع الطائرات، ولكن الصغيرة منها. تمَ تطوير هذه

العائلة من المحركات بشكل أفضل لتعمل على أنواع وقود مشتقة من النفط تتوافر بشكلٍ كبير على شكل بنزين ووقود الديزل ووقود الطيران النفاث. إن الناحيةَ السلبية في استخدام الوقود النفطي، بالطبع، هو أنها تشتق كلها من النفط الخام، المصدر غير المُتجدد الذي سوف يكون في النهاية ذا مخزون قصير الأجل. كذلك تنتج عملية الاحتراق انبعاثات لأكاسيد النيتروجين، وأول أكسيد الكربون، وكربوهيدرات غير محترقة، بالإضافة إلى كميات كبيرة من غاز CO_2، غاز الدفيئة الرئيس. طالما أننا ناقشنا في الفصل السادس التصورات المُحتملة للتعامل مع انبعاثات غاز CO_2 باستخدام حجز الكربون وتقنيات التخزين، فمن الواضح أن تطبيقها غير مناسب بالنسبة إلى المَركبات المُتحركة من أي نوع. وبِذلك يستمر البحث لإيجاد مصادر طاقة بديلة بالنسبة إلى النقل، التي من خلالها يمكن تخفيف المُساهمات الكبيرة جداً لانبعاثات غازات الدفيئة من قطاع النقل.

إحدى الطرق لتخفيض اعتماد قطاع النقل على الوقود النفطي يعود إلى استبدال استخدام محركات الاحتراق الداخلي التي تعمل على النفط إلى شكل مُختلف تماماً لحامل الطاقة. تم ذلك بنجاح في النقل السككي باستخدام قاطرات كهربائية مرتبطة نُظمياً مع أحجام المرور الكبيرة. وهذا ممكن بالنسبة إلى النقل السككي حيث يمكن توفير الطاقة الكهربائية باستمرار إلى القاطرة عبر كابلات كهربائية علوية، أو عبر «سكة- ثالثة» مُثبتة بالقرب من الخط أو المسار. على الرغم من أن هذه الطريقة توفر مصدراً نظيفاً جداً من الطاقة عند طرف الاستهلاك، حتى إذا تم توليد الكهرباء بشكلٍ رئيس من الوقود الأحفوري، فإن ذلك قد لا يؤدي إلى تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة كنتيجة لكهربة الخطوط الحديدية. إذا تمَ، على المَدى الطويل، توليد الطاقة الكهربائية اللازمة بشكل رئيس من مصادر وقود غير أحفورية، مثل الطاقة المتجددة أو الطاقة النووية، سوف يكون هناك فائدة مباشرة عبر التخلص من إنتاج غازات الدفيئة من النقل

على الخطوط الحديدية. حتى إذا تمت كهربة جميع الخطوط الحديدية، واستخدمت مصادر طاقة أولية من وقود غير أحفوري، سوف يكون الإسهام في تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة معتدلاً قليلاً لأن النقل السككي يشكل 6 في المئة فقط من مُجمل استخدام طاقة النقل، كما هو مبيّن في الشكل (9-1). ومع كون النقل يشكل 25 في المئة تقريباً من إجمالي الطلب على الطاقة، فإن ذلك سوف يؤدي إلى تخفيض 1.5 في المئة فقط من الإنتاج العالمي لغازات الدفيئة. لا يزال يبقى ذلك إسهاماً مفيداً، ويمكن أن نتوقع تقدماً مستمراً في كهربة النقل السككي، بالأخص عندما يمكن تبرير ذلك بواسطة عوامل تعتمد على العدد الكبير للمُسافرين أو شحن البضائع والحمولات. وبالنسبة إلى المَركبات البرّية، فإنه ليس عملياً تزويد الطاقة الكهربائية باستمرار للسيارات والشاحنات، ويجب أن تعتمد المَركبات الكهربائية الحصرية على الطاقة المخزّنة في بطاريات أو مدخرات كيميائية مَحمولة على متن المَركبة. وعلى الرغم من أن السيارات الكهربائية كانت شائعة خلال التطوير المُبكر جداً للمَركبات ذات المحرك، فإن سعة الطاقة المُنخفضة للبطاريات في هذه المَركبات جعلتها غير تنافسية مع المَركبات المُزوّدة بمحركات احتراق داخلي، ما جعل المَركبات الكهربائية تختفي من الأسواق. بالطبع، خلال هذا الزمن لم يكن هناك اعتبار للمشاكل المترافقة مع توليد غازات الدفيئة، وهكذا أصبحت المَركبات التي تعمل على المواد النفطية هي المعيارية. وكما سنرى لاحقاً في هذا الفصل، فإن الاهتمامات الحديثة بانبعاثات غازات الدفيئة، بالإضافة إلى الاستدامة طويلة الأمد للوقود الأحفوري، يمكن أن تؤدي حقاً إلى العودة للمَركبات الكهربائية في كثير من التطبيقات.

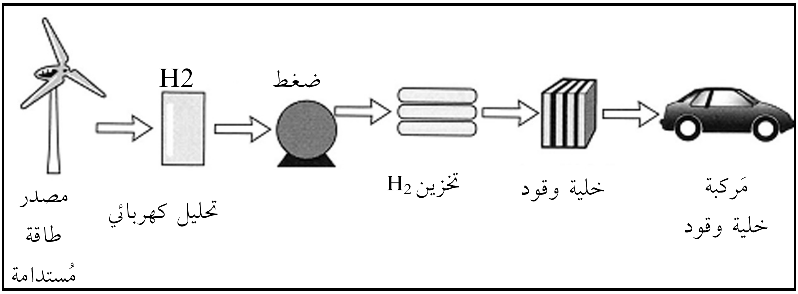
إن استخدام «الوقود البيولوجي» (Biofuels) السائل، من ضمنه الإيثانول والميثانول بالإضافة إلى وقود الديزل الحيوي المصنوع من الزيوت النباتية، هو طريقة أخرى لمقاومة الإسهام الكبير لانبعاثات

غازات الدفيئة الناتجة من استخدام الوقود النفطي. وعلى الرغم من أن هذه المواد تبقى من نوع الوقود الذي يحتوي على الكربون، وبالتالي تنتج أيضاً انبعاثات غاز CO_2 لأنها مُشتقة من مصادر الكتلة الحيوية، ولكنها تعتبر عادةً «حيادية الكربون» لأن الكتلة الحيوية تستهلك غاز CO_2 خلال طور نمو النبات. إن تقنيات إنتاج وقود الكحول معروفة جيداً، وهذا الوقود مُناسب للاستعمال في محركات الاحتراق الداخلي مع توفير بعض التعديلات الطفيفة على المحرك وعلى نظام التزوّد بالوقود. يصنع عادةً الإيثانول من محاصيل الحبوب، وإن مساحة الأرض المطلوبة لإنتاج كميات كبيرة من الإيثانول المَطلوب لتلبية حاجات كل مُتطلبات النقل سوف تكون كبيرة جداً. لذلك، من المحتمل أن إنتاج الطاقة بهذه الطريقة سوف يتنافس مباشرة مع توافر الأرض المطلوبة من أجل إنتاج الغذاء، وكما رأينا في الفصل السابع، إن إنتاج الإيثانول يمكن أن يكون في حد ذاته عملية مُستهلكة كثيراً للطاقة. أما الميثانول، المصنوع من نفايات الأخشاب، أو من أنواع شجرية سريعة النمو، فيمكن أيضاً أن يصبح مصدراً مهماً للوقود في تطبيقات النقل. إن لهذه الأنواع من الوقود الكحولي كثافة طاقة عالية (على الرغم من أن هذه الكثافة هي فقط حوالى نصف تلك الكثافة الموجودة لدى وقود المُشتقات النفطية)، وإن استخدامها المتوسع سوف يتطلب تغييراً صغيراً جداً في البنية التحتية المستخدمة حالياً لنقل وتخزين الوقود النفطي. وعلى الرغم من أن ذلك يمكن أن يتطلب أيضاً بعض التعديلات على تصميم مُحرك الاحتراق الداخلي، يمكن لهذه التعديلات أن تكون طفيفة، ويُمكن إدخالها بسهولة بالتدريج في إنتاج المُحركات ذات الإشعال الومَضي (Spark-ignition) العادي، أو ذات التزوّد بوقود البنزين. في الحقيقة، إن كلاً من الإيثانول والميثانول هما حالياً مستخدمين في بعض أنواع الوقود «المَخلوطة»، حيث يشكل البنزين العنصر الأساس لهذه الأنواع من الوقود. غير أن أنواع الوقود

الكحولية ليست مُناسبة للاستخدام في محركات الديزل ذات الإشعال الانضغاطي (Compression-Ignition)، على الرغم من أن وقود الديزل الحيوي يمكن أن يصنع من فول الصويا ومحاصيل أخرى، كما رأينا في الفصل السابع. إذا وُجد بأن المواد الكربوهيدراتية النفطية هي ضرورية لإنتاج وقود الطيران، يمكن الإبقاء على إنتاجها لسنوات عديدة من أنواع وقود صناعية شبيهة بالنفط، مُشتقة من الرمال النفطية أو الصُخور النفطية، أو حتى من الفحم الحجري باستخدام تقنيات تسييل الفحم الحجري.

9. 2. المَركبات البرية

من أجل تزويد النقل البرّي بالوقود في المستقبل، وبخاصة المركبات العادية، كان هناك رهان كبير حول استخدام الهيدروجين كحامل للطاقة، الذي بحَسب كثير من المُؤلفين و«رؤى المستقبل» سوف يدخل في «اقتصاد الهيدروجين». يَدّعي مؤيدو اقتصاد الهيدروجين أن استخدام الهيدروجين كوقود للنقل سوف يُنهي إنتاج أي انبعاثات ضارة من عوادم المَركبات على الطرقات. بالطبع، هذا صحيح بالنسبة إلى المركبة نفسها، لكن كما لاحظنا في مناقشتنا لسلسلة تحويل الطاقة في الفصل الثاني، يمثّل ذلك جزءاً واحداً من الصورة الكاملة لاستخدام الطاقة. وسوف يكون الهيدروجين بالتحديد حامل طاقة، مثل البنزين أو الكهرباء حالياً، وسيكون مطلوباً «للتصنيع» من أحد مصادر الطاقة الأوّلية الثلاثة. إذا حُدد هذا المصدر الأوّلي ليكون وقوداً كربوهيدراتياً، كالغاز الطبيعي أو الفحم الحجري، فإن جميع الكربون الموجود في مصدر الطاقة الأولي سوف ينتهي كغاز CO_2 عند نقطة إنتاج الهيدروجين. من ناحية أخرى، إذا تم إنتاج الهيدروجين من مصدر طاقة أوّلي أكثر استدامة، مثل الطاقة المتجددة أو الطاقة النووية، عندها لن يكون هناك بالطبع إنتاج لغازات الدفيئة في أي مكان في سلسلة تحويل الطاقة. يُبيّن الشكل (9-2) رسماً تخطيطياً لتوضيح سلسلة تحويل الطاقة من أجل



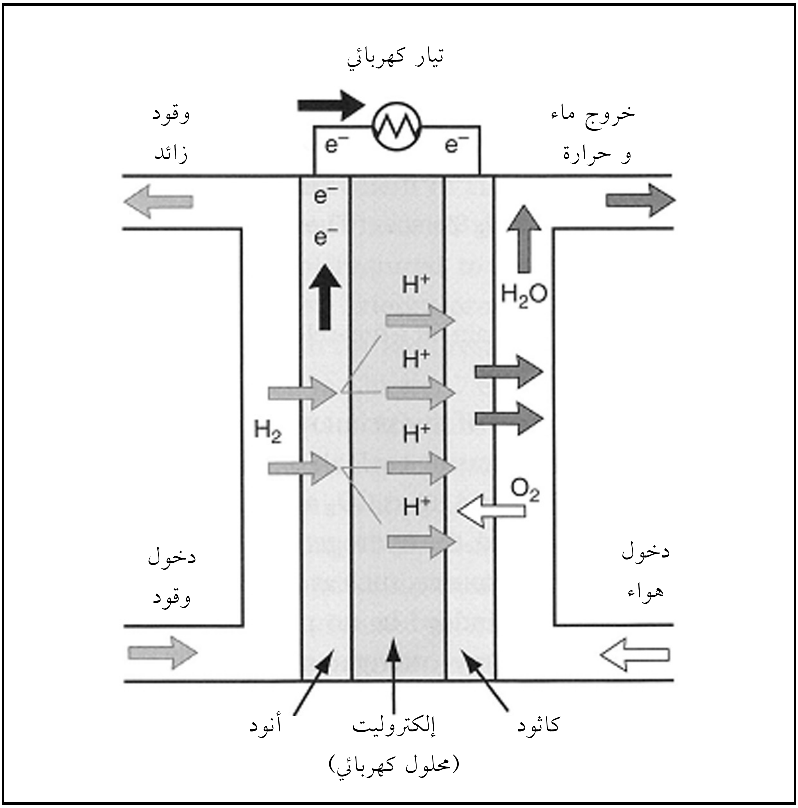
الشكل (9-2): سلسلة تحويل الطاقة في مركبة خلية - وقود.

استخدام الهيدروجين بالطريقة أعلاه. يُوضح هذا الرسم التخطيطي أن مصدر الطاقة الأوّلي هو من بعض أشكال الطاقة المُستدامة، مُمَثلةً بطاقة الرياح المُولِّدة للكهرباء في الشكل، لكن هذا المصدر يمكن أن يكون طاقة شمسية، أو أي مصدر آخر من الطاقة المُتجددة أو الطاقة النووية. بمُتابعة سلسلة تحويل الطاقة، نجد أن الكهرباء سوف تُستخدم بعدئذٍ لإنتاج الهيدروجين بواسطة التحليل الكهربائي للماء، وبعدها سوف يُضغط الهيدروجين، أو يُحوّل إلى شكل سائل، من أجل التخزين على متن المَركبة. وسوف تَستخدم المَركبة قيادة كهربائية تامة، حيث تُستخدم وحدة خلايا وقود لتوليد الكهرباء عند الطلب من الهيدروجين، التي سوف تُزوّد بعد ذلك إلى محرك كهربائي، مُوفِّراً الطاقة الميكانيكية لقيادة المَركبة.

من حيث المبدأ، إن خلية الوقود هي عبارة عن جهاز تحويل طاقة كهروكيميائي بسيط جداً الذي يحوّل الطاقة الكيميائية، المخزّنة في وقود كالهيدروجين، مباشرةً إلى طاقة كهربائية. تم اختراع خلية الوقود عام 1839 من قبل المخترع الويلزي (البريطاني) السير وليام غروف (Sir William Grove)، حوالى خمسين عاماً قبل أن يصبح محرّك الاحتراق الداخلي حقيقةً، وكوَّن فضولاً علمياً بشكل جوهري خلال الـ120 سنة اللاحقة. في ستينيات القرن الماضي، تم تطوير خلايا وقود عملية بغية استخدامها في السفن الفضائية لكي تؤمّن مصدراً متواصلاً من الطاقة الكهربائية للمَركبة الفضائية باستخدام

الهيدروجين السائل الذي كان أيضاً يستخدم كوقود للدفع. بعدئذٍ، في سبعينيات القرن الماضي بدأت شركات عدة بتطوير خلايا وقود لتوليد الكهرباء بدلاً من محطات الطاقة التقليدية التي تعمل على محركات الاحتراق الداخلي أو البخار. هناك أنواع مختلفة ومتعددة من تصاميم خلايا الوقود، لكن معظمها تعمل أولاً بفصل ذرة الهيدروجين إلى بروتون موجب الشحنة، وإلكترون سالب الشحنة، وبعدئذٍ يرسل الإلكترون عبر دارة خارجية ليعود وينضم مع البروتون وجزَيء أكسجين ليشكل ماءً. إذا زُوّد الهيدروجين والأكسجين باستمرار إلى خلية الوقود، فإن هذه العملية سوف تؤدّي إلى تيار من الإلكترونات، أو إلى تيار كهربائي يمكن أن يغذّى بعدئذٍ إلى الشبكة الكهربائية، أو يستخدم مباشرة لتغذية محرك كهربائي. كذلك، تتابع حالياً خلايا الوقود كمصدر طاقة مُحتمل في المَركبات، وتُعتبر خلية الوقود نوع (Proton Exchange Membrane - PEM) (غشاء تبادل بروتون أو غشاء محلول كهربائي بوليميري) التصميم المألوف المختار من أجل هذه التطبيقات. ومن محاسن خلايا وقود التبادل البروتوني (PEM) في هذه التطبيقات هو أنها تعمل عند درجات حرارة منخفضة نسبياً (حوالى 80 درجة مئوية)، وهي صغيرة الحجم مقارنةً بالتصاميم الأخرى التي تعتبر كلها مُفضلة لتطبيقات توليد الطاقة الثابتة الكبيرة.

يُوضح الشكل (9-3) عمل خلية الوقود (PEM) من نوع تبادل بروتوني، الذي يُبيّن صفيحتين هما الأنود والكاثود، مُنفصلتين عن بعضهما بعضاً بواسطة إلكتروليت (محلول كهربائي). يتم تزويد الوقود، على شكل هيدروجين نقي، باستمرار إلى الأنود، بينما يزوّد الأُكسجين أو الهواء إلى الكاثود. يتم تلبيس المصعد بمادة وسيطة (مُحفزة) من معدن ثمين، عادة البلاتين، التي تساعد على تأيّن ذرّات الهيدروجين إلى تيارين منفصلين من البروتونات (مبيّنة كـ H^+) وإلكترونات (مبيّنة كـ e^-) في هذه الحالة، يكون الإلكتروليت هو عبارة عن غشاء بوليميري صلب، تم تطويره أولاً بواسطة شركة دوبون (Dupont) تحت الاسم



الشكل (9-3): عمل خلية وقود تبادل بروتوني ذات غشاء محلول كهربائي بوليميري.

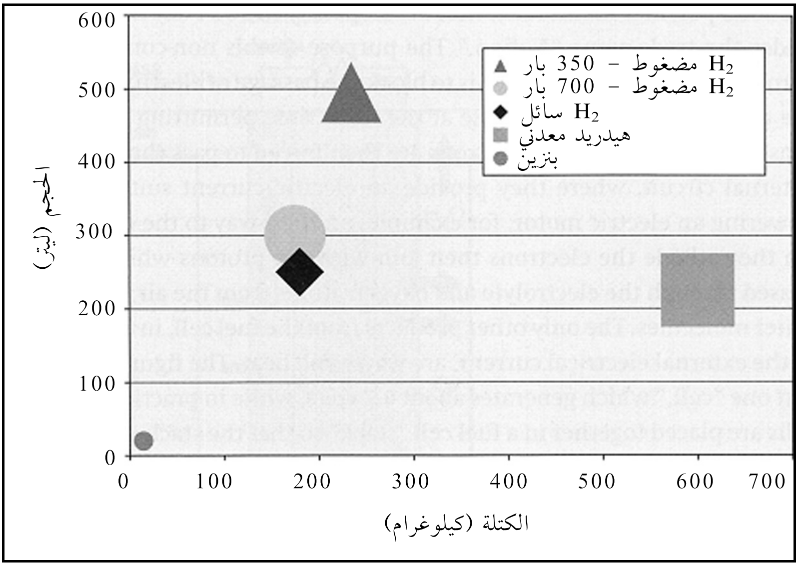
التجاري نافيون (Nafion). إن الغرض من هذا الغشاء «العازل لتبادل البروتونات» هو لإيقاف عبور الإلكترونات من الأنود (Anode) إلى الكاثود، بينما في الوقت نفسه السماح للبروتونات بالعبور من خلاله. تجبر بعدئذٍ الإلكترونات على العبور خلال دارة خارجية، حيث إنها تقوم بتوفير تيار كهربائي مُناسب لتشغيل محرّك كهربائي مثلاً خلال طريقها إلى الكاثود (Cathode). بعدئذٍ تتحد الإلكترونات على الكاثود مع البروتونات التي عَبرت عبر المحلول الكهربائي ومع ذرات الأكسجين من الهواء، لتشكل جزَيئات الماء. إن النواتج الأخرى من خلية الوقود، بالإضافة إلى التيار الكهربائي الخارجي، هي الماء

والحرارة فقط. يبيّن الشكل خلية وقود واحدة، التي تولّد حوالى 0.7 فولت، بينما عملياً يتم ربط خلايا عدة مع بعضها البعض وتوضع في «رزمة» خلايا وقود بحيث تُوَفر المجموعة فرق جهد إجمالي أعلى. على الرغم من بساطة خلية الوقود من ناحية المبدأ، ومن دون أجزاء متحركة، ففي الحقيقة تصبح أي وحدة طاقة مستقلة وكاملة، مؤلفة من مجموعة خلايا وقود، نوعاً ما مُعقّدة أكثر مع الحاجة إلى ضواغط للتغلب على هبوط ضغط الوقود وتدفق الهواء عبر المجموعة. يجب أيضاً أن يكون وقود الهيدروجين نقياً جداً، وينبغي ألاّ يحتوي على أي أثر لأول أكسيد الكربون، لأن هذا الأكسيد سوف يسمم المادة المُحفّزة بسرعة، ويمنع تأيّن الهيدروجين بِكفاءة عند الكاثود. تعتبر مجموعات خلايا الوقود نوع التبادل البروتوني (PEM) أيضاً غالية الثمن جداً في حالة التطوير الحالية بالمُقارنة مع مُحركات الاحتراق الداخلي مثلاً، وبشكل رئيس بسبب الحاجة إلى البلاتين كمادة محفّزة. إن التطوير الأكثر حداثةً هو المُحاولة لتخفيض كلفة المواد المُحفّزة وأن خليطاً من البلاتين والروثينيوم قد تَبيّن أنه فاعل عند مستويات أقل بكثير من تحميل المُحفّز.

إذا نَظرنا الآن إلى الوراء بإيجاز إلى سلسلة تحويل الطاقة في الشكل (9-2)، سوف نُلاحظ أن خلية الوقود هي تماماً جزء واحد من السيارة المُغذّاة بواسطة خلية وقود هيدروجينية. هناك عنصر مهم جداً في نظام دفع المَركبة وهو نظام تخزين الوقود على متن المَركبة. بالنسبة إلى عربة تقليدية تستخدم مُحرك احتراق داخلي، يكون هذا النظام عبارة عن خزان وقود بسيط، يخزّن وقود البنزين أو الديزل، حيث إن كلاهما موجود بشكل ملائم كوقود سائل عند ظروف محيطية طبيعية لكل من درجة الحرارة والضغط. وعند الظروف المُحيطية نفسها لدرجة الحرارة والضغط، يكون الهيدروجين عبارة عن غاز، ولدى هذا الغاز كثافة طاقة مُنخفضة جداً، هذا يعني أن متراً مُكعباً واحداً من غاز الهيدروجين

يحوي طاقة أقل بكثير من متر مكعب واحد من الوقود السائل. ولكي نحمّل كمية جيدة من الطاقة على متن المَركبة على شكل هيدروجين، سوف يحتاج غاز الهيدروجين إلى أن يكون مضغوطاً بشكل كبير، أو بالطبع مُسالاً ومخزّناً في خزان وقود «تبريدي» خاص عند درجة حرارة حوالى 250− درجة مئوية. ولكي نخزّن طاقة هيدروجين كافية لتأمين مدى قيادة معقول، اقترح مُهندسون استخدام هيدروجين مضغوط عند ضغط 350 بار (5000 باوند/ إنش^2)، أو حتى 700 بار (10000 باوند/ إنش^2). تتطلب هذه الضغوط العالية جداً أسطوانات تخزين غاز ثقيلة، التي سوف تضيف ثقلاً وحجماً كبيرين إلى المَركبة بالمقارنة مع خزان الصفيح المعدني المألوف والمستخدم في حالة الوقود السائل. في الحقيقة، إن تخزين الهيدروجين على متن المَركبات هو أحد التحديات الأكثر صعوبة التي تواجه التسويق التجاري الناجح للمَركبات التي تعمل على الهيدروجين كوقود.

يلخّص الشكل (9-4) هذه المشكلة الصعبة في تخزين الهيدروجين باستخدام بيانات من روفيرا (2001)، والذي يرسم بيانياً الحجم المطلوب لنظام تخزين كمية معيّنة من الطاقة كتابع للكتلة الإجمالية لمصدر الطاقة والخزان المطلوب لتخزينه. توفر نقاط البيانات على المخطط تقديراً للحجم (المبيّن على المحور الرأسي على اليسار) والكتلة الإجمالية (المبينة على المحور الأفقي) المطلوبتين لتخزين 5 كيلوغرام من الهيدروجين، أو مكافئة الطاقة لهذه الكتلة. سوف تكون هذه الكمية من الهيدروجين مكافئة بالطاقة لحوالى 18 ليتراً من البنزين، أو تقريباً لحوالى نصف إلى ثلث سعة معظم خزانات وقود السيارات. إذا تم تخزين غاز الهيدروجين في أسطوانات عند ضغط 350 بار، فإن حجم الخزانات سوف يكون 500 ليتر تقريباً، وستكون كتلتهما (بالإضافة إلى 5 كيلوغرام هيدروجين) بحدود 225 كلغ. يُمثل ذلك حجماً أكبر من مُجمل حيِّز صندوق السيارة في مُعظم السيارات، وسوف تشكل الكتلة حوالى 25



الشكل (9-4): الحجم والكتلة لنظام لتخزين 5 كيلوغرام من الهيدروجين، أو ما يكافئه من الطاقة.

المصدر: G. Rovera, "Potential and Limitations of Fuel Cell in Comparison with Internal Combustion Powertrains," paper presented at: Internal Combustion Engine (ICE), Capri, Italy, 2001.

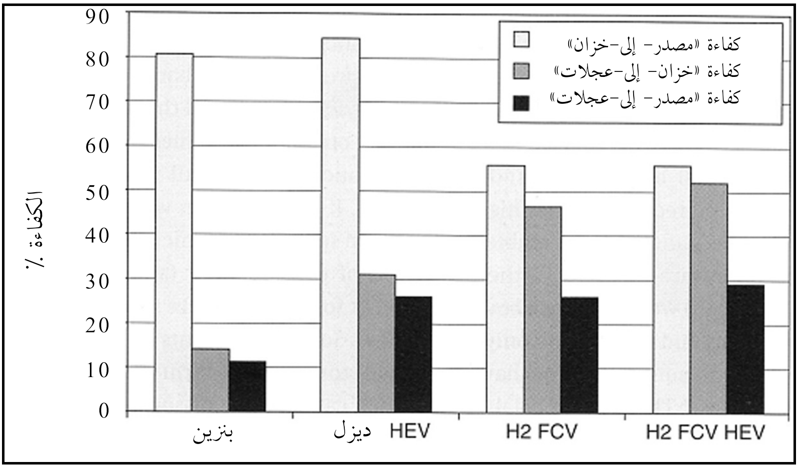
في المئة من إجمالي كتلة سيارة صغيرة. عند ضغط تخزين 700 بار سوف يكون إجمالي حجم التخزين مُخفضاً إلى حوالى 300 ليتر، والكتلة لحوالى 180 كيلوغرام. لن تساوي هذه الأرقام تماماً نصف القيم في حالة التخزين عند 350 بار، حيث إن الأسطوانات سوف تكون بسماكات أكبر تحت ضغط أعلى. وإذا كان من المفروض تسييل الهيدروجين وتخزينه تحت ضغط عادي في خزانات تبريدية خصوصاً عند درجة حرارة 250 درجة مئوية تحت الصفر، عندئذٍ سوف تبقى كتلة نظام التخزين (والهيدروجين السائل) حوالى الكتلة نفسها في حالة تخزين عالي الضغط تحت 700 بار، والحجم سوف يكون أقل بقليل. لقد اقترح بعض مؤيّدي الهيدروجين كوقود للسيارات التخزين على شكل «هيدرات معدنية». وهي عِبارة عن خلائط خاصة

تُحفز تفكيك جزَيئات الهيدروجين عند سطح المعدن، وبالتالي المساعدة على امتصاص ذرات الهيدروجين مباشرة إلى الشبكة الكريستالية المعدنية، ما يمكِّن من تخزين أحجام كبيرة من الهيدروجين تحت ظروف الضغط الجوي العادي. ويتطلب ذلك حمل كمية كبيرة جداً من المعدن الماصّ، الذي يمكن أن يمثّل كتلة أكبر من نصف كتلة سيارة نموذجية وهي فارغة، كما هو مبيّن عند أقصى يمين المخطط.

أخيراً، إن نقطة البيانات الصغيرة قرب المركز تمثل الحجم والكتلة المطلوبتين لتخزين 18 ليتراً من البنزين (الطاقة المكافئة لـ 5 كيلوغرام من الهيدروجين)، وتبيّن بوضوح فائدة سعة تخزين الطاقة العالية لأنواع الوقود الكربوهيدراتي السائل التقليدي. من هذه البيانات يمكن ملاحظة أن تخزين الهيدروجين على متن السيارات من المحتمل أن يكون أحد أكبر التحديات التي تواجه أي جهة تحاول تطوير المَركبات التي تعمل على الهيدروجين كوقود لأغراض تجارية.

إن إحدى المحاسن المنسوبة إلى مَركبات خلايا الوقود، هي كفاءة تحويل الطاقة العالية جداً لخلايا الوقود بالمُقارنة مع محركات الاحتراق الداخلي. وإن كفاءة خلية وقود تبادل بروتوني (PEM) (حوالى 50 في المئة)، هي بالتحديد أعلى مما يمكن توقعه بالنسبة إلى مُحرك احتراق داخلي نموذجي يستخدم في السيارات. وإذا استخدم الهيدروجين كحامل طاقة على متن المَركبة، وإذا اشتُق هذا الهيدروجين من الوقود الأحفوري، كما سيحصل تقريباً بالتحديد في أي مرحلة مبكرة لتسويق مثل هذه المَركبات، من غير المحتمل عندئذٍ أن تكون الكفاءة الإجمالية «مصدر - إلى - عجلات» أعلى من تلك التي تخص أفضل تكنولوجيا مُتوافرة باستخدام محرك احتراق داخلي تقليدي. هذه هي الخلاصة المُوجودة في دراسات مُقارنة لكفاءة ناقل حركة المَركبة التي أُعدت من قبل كل من مختبر أرغون الوطني التابع

لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة، ومن قبل باحثين في معهد ماساشوستس للتكنولوجيا (MIT). يختصر الشكل (9-5) النتائج من الدراسة التي نشرها مختبر أرغون الوطني (US DOE -ANL, 2005). قامت الدراسة بمُحاكاة أداء تشكيلات عدة لنواقل الحركة المُحتملة لمَركبة من نوع (Ford Explorer SUV)، والنتائج لأربعة أنواع من هذه المَركبات مُبيّنة في الشكل (9-5). إن مصدر الطاقة الرئيس المستخدم في كل من الأربع حالات المُبيّنة كان محرك بنزين تقليدياً؛ محرك ديزل يعمل في مَركبة كهربائية هجينة (Diesel HEV)؛ مركبة خلايا وقود هيدروجينية (H2FCV)؛ وخلايا وقود هيدروجينية تعمل في مَركبة كهربائية هجينة (H2FCV HEV). بالنسبة إلى كلٍ من خياري خلايا الوقود المبينين، تَم افتراض أنه يتم الحصول علَى الهيدروجين من محطة تزويد بالوقود بواسطة تفكيك الغاز الطبيعي، الذي سوف يكون المَصدر الأكثر احتمالاً للطاقة الأولية، على الأقل في الطور المُبكر لتسويق خلايا الوقود. إن كفاءة تحويل الطاقة الأوّلية، إما النفط الخام أو الغاز الطبيعي إلى وقودٍ على المتن لكل مَركبة، إما بنزين أو ديزل أو هيدروجين، مبيّنة بكفاءة «مصدر- إلى- خزان». ويمكن ملاحظتها على أنها تماماً قريبة من 80 في المئة للبنزين، وأعلى بقليل من تلك القيمة لوقود الديزل، بينما للحصول على هيدروجين من الغاز الطبيعي تكون الكفاءة 56 في المئة تقريباً. تمت مُحاكاة الكفاءة لكل مصدر رئيس خلال تشغيله بالتعاون بين دائرة قيادة الطرقات الفيدرالية للولايات المتحدة ودائرة القيادة المدنية الفيدرالية، بناءً على اقتراح من جمعية مهندسي السيارات. إن نتائج هذه المُحاكاة مُبيّنة بكفاءة «خزان- إلى- عجلات» في الشكل (9-5) بالنسبة إلى كل حالة. أخيراً، إن إجمالي الكفاءة «مصدر- إلى- عجلات» تم الحصول عليها بحاصل جدوى هاتين الكفاءتين ببعضهما بعضاً. تبين هذه النتائج أن إجمالي الكفاءة «مصدر- إلى- عجلات» للسلسلة الكاملة في عملية تحويل الطاقة هي بالضبط تقريباً متساوية بالنسبة إلى



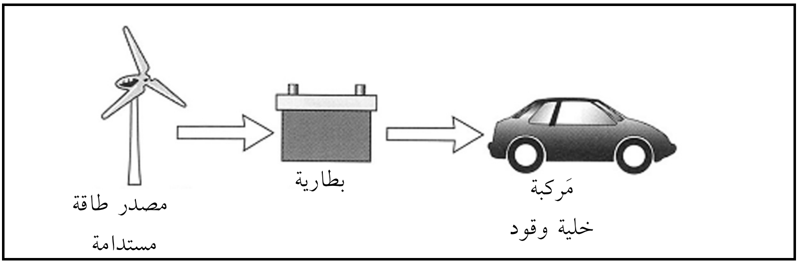
الشكل (9-5): مقارنة كفاءة «مصدر-إلى-عجلات» للسيارة نوع SUV.

المصدر: A. Rousseau [et al.], "Well-to-Wheels and Analysis of Advanced SUV Fuel Cell Vehicles," paper presented at: Society of Automotive Engineers (SAE), Detroit, MI, USA, 2003.

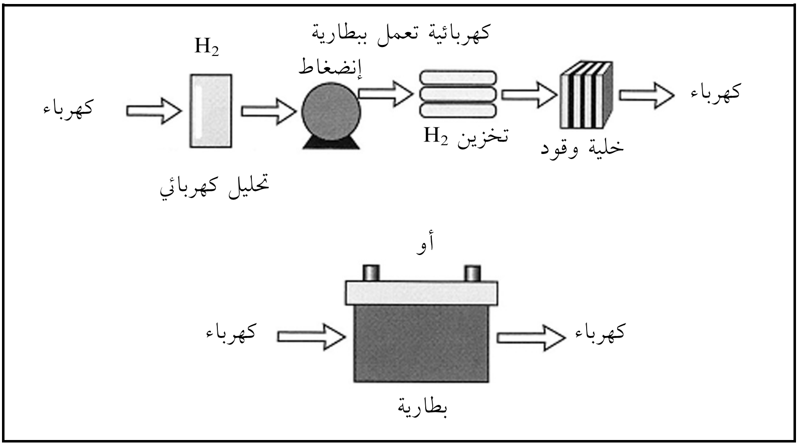
محرك الاحتراق الداخلي الأفضل (ديزل) ولتشكيلة المَركبة الهجينة ولمَركبة خلايا وقود هيدروجينية بسيطة. في حالة خلية الوقود الهيدروجينية في تشكيلة مَركبة كهربائية هجينة، إن الكفاءة هي بالضبط (29 في المئة) أعلى بقليل من الكفاءة في حالة المَركبة (HEV)⁻ ديزل التي هي 26 في المئة. كذلك، إذا كان مصدر الطاقة الأولي، هو، وقوداً أحفورياً لكلا التشكيلين، كما هو مفترض في الدراسة، فسوف تكون النتيجة انبعاثات غاز CO_2 بمستويات متطابقة تقريباً. وبالتالي، من غير المتوقع أن يكون هذا الربح البسيط في الكفاءة الإجمالية للمَركبة كافياً للتغلب على الكلفة الأعلى بكثير وتعقيدات نظام تخزين الهيدروجين وخلية الوقود بحد ذاتها. ويجادل المدافعون عن مَركبات خلايا الوقود بأنه على المدى الطويل سوف يتم إنتاج الهيدروجين من شكل أكثر استدامة للطاقة، بالطبع الطاقة المُتجددة، كما هو مُوضح في الشكل (9-2)، أو من الطاقة النووية التي لن

تؤدي مستقبلاً إلى أي انبعاثات لغاز CO_2 خلال السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة.

إذا اعتبرنا الحالة التي يُولّد فيها الهيدروجين من مصدر أوّلي متجدد، أو من طاقة نووية، نلاحظ في الشكل (9-2) أن المرحلة الأولى في سلسلة تحويل الطاقة هي توليد الكهرباء كحامل طاقة ابتدائي. يتم تحويل هذا الحامل إلى هيدروجين كحامل ثانوي، ويتم تخزينه على متن المَركبة. أما المرحلة الأخيرة في السلسلة فهي تحويل الهيدروجين المُخزن من جديد إلى كهرباء بواسطة خلايا الوقود، التي تستخدم لتغذية محرك الدفع الكهربائي. هناك وضعية على التوازي تستخدم في مَركبة كهربائية بسيطة تعمل على البطارية، والتي تستخدم فيها بطاريات على متن المَركبة لتخزين الكهرباء، كما هو مبيّن بواسطة مخطط سلسلة تحويل الطاقة في الشكل (9-6). في هذه الحالة ليس هناك حاجة إلى تحويل الكهرباء إلى حامل ثانوي بما أن الكهرباء المولّدة كحامل أولي تُخزَن مباشرة بواسطة البطارية، لتُستَخْدَم عند الطلب لتغذية محرك الدفع الكهربائي. إن الاختلاف الوحيد بين سلسلتي تحويل الطاقة المرسومتين في الشكل (9-2) لمَركبة خلايا الوقود، وفي الشكل (9-6) للمَركبة الكهربائية ذات البطارية، هو أنه في الحالة الأولى يتم تخزين الطاقة على شكل هيدروجين، أما في الحالة الثانية فيتم ذلك على شكل طاقة كهربائية في البطارية. يُمكن تلخيص الاختلاف في هاتين الطريقتين برسم تخطيطي كما هو مُوضح في الشكل (9-7) الذي يبين هاتين الطريقتَين المختلفتين، بدءاً من النقطة التي ينتج فيها مصدر الطاقة الابتدائي (الكهرباء)، وإنتهاءً بمكان استخدام الكهرباء ثانيةً لتغذية محرك الدفع الكهربائي للمَركبة. بتعبير آخر، إن جميع التجهيزات الموضحة بواسطة سلسلة التحويل في النصف الأعلى من الشكل، مؤلفةً من إنتاج الهيدروجين بواسطة التحليل الكهربائي للماء، وضغط وتخزين في خزانات ضغط - عالٍ، وأخيراً التحويل ثانيةً إلى



الشكل (9-6): سلسلة تحويل الطاقة لمرَكبة كهربائية تعمل ببطارية



الشكل (9-7): أفكار بديلة لتخزين الطاقة الكهربائية.

كهرباء بواسطة خلية الوقود، هي مقابلة بالتشابه مباشرة للبطارية في النصف الأسفل من الشكل. بعمل مقارنة بسيطة لكلا الجزئين من الشكل، يُمكن المُلاحظة بوضوح أن جميع التجهيزات المطلوبة في مركبة خلايا - وقود، متضمنةً إنتاج الهيدروجين وتخزينه وخلية الوقود، هي في الحقيقة وبالضبط جهاز تخزين طاقة كهربائي. وهكذا، هناك ميزة حسنة واحدة لهذه الطريقة على تلك التي تستخدم بطارية تخزين بسيطة، فقط إذا كانت سعة تخزين الطاقة على متن المركبة أعلى باستخدام خلية الوقود.

على الرغم من القول إن مراحل العملية المُبينة بالشكل (9-7) ليست جميعها عمليات تحويل طاقة، فإن هناك فقداناً للطاقة مُترافقاً مع كل مرحلة. مثلاً، بما أن عملية ضغط الهيدروجين إلى ضغط حوالى 350 بار المستخدم في أسطوانات التخزين تأخذ 10 في المئة تقريباً من إجمالي محتويات الطاقة في الهيدروجين، فإنه من أجل كل 100 كيلو جول من طاقة الهيدروجين المنتجة بواسطة التحليل الكهربائي للماء، تكون الطاقة الصافية التي تبقى بعدئذٍ في خزان الهيدروجين هي حوالى 90 كيلو جول. لأخذ هذا الفقدان بالحسبان، يمكننا أن نُحدد قيمة كفاءة «دخل- خرج» لكل مرحلة في العملية، كما هو مُبيّن في الجدول (9-1). بالنسبة إلى البطارية، هناك مرحلة واحدة فقط بين الدخل الكهربائي إلى تخزين الطاقة وخرج الطاقة إلى المَركبة، وبما إن جزءاً من هذه الطاقة يَضيع بشكل طبيعي على شكل حرارة خلال عملية شحن البطارية، نستطيع أيضاً أن نحدد كفاءة «دخل- خرج» للبطارية. إن كفاءة الشحن هي عادة بين 85 في المئة و95 في المئة بالنسبة إلى البطاريات الرصاصية - الحمضية، على الرغم من أنها يمكن أن تكون أقل بكثير من أجل أنواع أخرى من البطاريات. وللمقارنة، إذا افترضنا كفاءة شحن بطارية تساوي 90 في المئة، فإن كفاءات «دخل- خرج» لكل مرحلة من مراحل عمليتي تخزين الطاقة المتكافئتين في الشكل (9-7) مبيّنة في الجدول (9-1). ومن ثم تتم عملية ضرب حسابي لكفاءات كل مرحلة على حدة ببعضها بعضاً للحصول على الكفاءة «الإجمالية» النهائية للعملية كاملةً، انطلاقاً من «دخل» الكهرباء من المصدر الأولي إلى «خرج» الكهرباء إلى محرك الدفع. بافتراض أن كفاءة تحويل الطاقة لخلية الوقود هي 50 في المئة، فإن الكفاءة الإجمالية «دخل-خرج» لسلسلة تحويل الطاقة لخلية الوقود المبيّنة في الشكل (9-7) تكون 34 في المئة تقريباً، مقارنةً بـ90 في المئة بالنسبة إلى البطارية التقليدية. بتعبير آخر، إذا أردنا استخدام كهرباء من بعض مصادر

الطاقة الأولية المُستدامة كحامل للطاقة في السيارة، فإن لكل 100 كيلو جول من الطاقة الأولية المستخدمة، سوف نكون قادرين على «ترحيل» حوالى 90 كيلو جول إلى محرك الدفع الكهربائي للمركبة باستخدام مدخرة رصاصية - حمضية لتخزين الطاقة. ولكن، إذا استخدمنا الهيدروجين مع خلية الوقود كنظام تخزين للطاقة، فلكل 100 كيلو جول من الطاقة الأولية المستخدمة،هناك فقط حوالى 34 كيلو جول سوف يتم ترحيلها إلى محرك الدفع. لقد استخدمنا تقديراً لكفاءة الإنتاج التجاري للهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء يساوي 75 في المئة، على الرغم من أن هناك بحوثاً وتطويراً في تقدم مستمر لرفع هذا المقدار. وحتى لو كان الهدف زيادة كفاءة التحليل الكهربائي للماء إلى 90 في المئة، فإن الكفاءة الإجمالية «دخل- خرج» سوف تصل فقط إلى حوالى 40 في المئة. يشير هذا التحليل البسيط إلى أن السيارات الكهربائية بشكل تام التي تستخدم بطاريات ذات كفاءة عالية مع كثافة تخزين للطاقة كافية لتأمين مدى معقول للمَركبة، سوف تكون بديلاً جذاباً جداً عن تلك التي تعتمد تخزين الهيدروجين وخلية الوقود.

الجدول (9-1):

كفاءات «دخل-خرج» كهربائية.

مقارنة كفاءة «دخل-خرج»			
خلية الوقود		**البطارية**	
التحليل الكهربائي للماء	75 في المئة	البطارية	90 في المئة
الانضغاط	90 في المئة	-	-
خلية الوقود	50 في المئة	-	-
الكفاءة الإجمالية	34 في المئة	الكفاءة الإجمالية	90 في المئة

إذا كانت البطاريات قادرة على تخزين طاقة كافية لتوفير مدى يصل حتى 100 ميل، فيمكن للسيارات البسيطة نسبياً ذات البطارية، والتي يمكن إعادة شحنها خلال الليل أو عندما تكون خارج

الاستخدام لساعات، أن تكون جيدة لمعظم المستهلكين. سوف تكون هكذا مَركبات أقل تعقيداً بكثير وأقل كلفةً للإنتاج من مَركبات خلية الوقود المماثلة مع إنتاج الهيدروجين الضروري وأنظمة تخزينه. إذا أصبحت هذه السيارات المعيار، فسوف يكون هناك حاجة إلى التوسع في القدرة العُظمى للنظام الكهربائي، على الرغم من أنه على المدى الطويل يمكن أن يكون هذا النظام أكثر استدامة مما هو عليه اليوم.

يبين الجدول (9-2) كثافة الطاقة (الطاقة بوحدة الحجم) والطاقة النوعية (الطاقة بوحدة الكتلة)، للبطاريات الرصاصية - الحمضية، والهدف من برنامج البطاريات المُتطورة لوزارة الطاقة الأميركية (US DOE, 2005)، بالإضافة إلى قيم البنزين السائل والهيدروجين المخزّن عند ضغط 200 بار. على الرغم من أن للهيدروجين طاقة نوعية عالية جداً، لكن، لأنه غاز، لديه كثافة طاقة مُنخفضة جداً، حتى عندما يُخزّن تحت ضغط مرتفع. يعني ذلك أنه يجب استخدام أسطوانات غاز مضغوط كبيرة، وبالتالي ثقيلة، لتخزين كمية مناسبة من الطاقة.

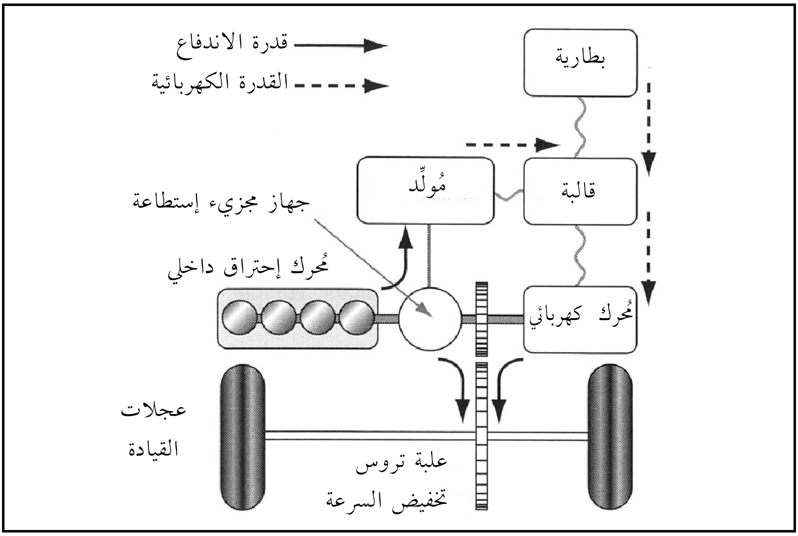
يمكن أيضاً رؤية أن البطاريات ليست قادرة لغاية الآن على منافسة الوقود السائل بالنسبة إلى كل من كثافة الطاقة أو الطاقة النوعية، ومن المتوقع أن تكون السيارات الكهربائية مناسبة فقط في تطبيقات معيّنة قصيرة- المدى بالنسبة إلى المستقبل المتوقع. لا يزال هناك الكثير من أعمال البحث والتطوير قيد الإنجاز على البطاريات، لكن لا يبدو هناك أي «خروقات» رئيسة في تصميم البطاريات التي من شأنها زيادة كثافة الطاقة إلى الحد الذي تكون فيه السيارات الكهربائية البسيطة ذات البطاريات قادرة على المنافسة، بالنسبة إلى المدى والأداء، بالمُقارنة مع السيارات التقليدية. وسيتم استخدام المَركبات الكهربائية ذات البطاريات بشكل رئيس في التطبيقات المُنخفضة السرعة، بعيداً من الطرقات العامة، حيث إن المدى ليس حرجاً، بتطبيقات مثل عربات ملاعب الغولف وكراسي المقعَدين الكهربائية، وذلك في الفترة القصيرة الآتية.

الجدول (9-2):
كثافة تخزين الطاقة

حامل الطاقة	كثافة الطاقة ميغا جول/كيلوغرام	الطاقة النوعية ميغا جول/ ليتر
بطاريات رصاصية - حمضية	0.32	0.11
الهدف للبطاريات المتقدمة	1.80	0.72
غاز الهيدروجين، 200 بار	1.9	119.88
البنزين	31.54	45.72

المصدر: وزارة الطاقة في الولايات المتحدة الأميركية، US Department of Energy (DOE).

إن كثيراً من أعمال التطوير على البطاريات قد دُفعت بواسطة الدخول الناجح في السنوات الأخيرة للمَركبات الكهربائية الهجينة (HEV). يبيّن الشكل (9-8) مخططاً مبسّطاً يوضح عمل المَركبة الهجينة، المبني على تصميم تويوتا بريوس (Toyota Prius) (شركة سيارات تويوتا، 2005). تستخدم هذه السيارات نظام دفع مكوَّناً من محرك احتراق داخلي تقليدي، يعمل كمصدر رئيس للطاقة، على التوازي مع محرك كهربائي وبطارية تخزين. إن مجمل الطاقة المستخدمة لقيادة المَركبة لا تزال تأتي من الوقود السائل (بنزين أو وقود الديزل) المستخدم من قبل محرك الاحتراق الداخلي، لكن هذا المحرك يستخدم إما لشحن البطارية بواسطة المولدة، أو لإدارة العجلات مباشرة كما هو الحال في المَركبة التقليدية، أو في بعض الحالات الدمج لكلتا الطريقتين. خلال العمل بسرعة - منخفضة، وبخاصةً عند التوقف والإقلاع خلال القيادة في مراكز المدن، يتم إيقاف محرك الاحتراق الداخلي، ويتم تأمين الدفع بواسطة المحرك الكهربائي باستخدام الطاقة الكهربائية المخزنة في البطارية. عندما تصبح البطارية مفرغة يُقلع محرك الاحتراق الداخلي أوتوماتيكياً ويبدأ ثانية بشحن البطارية، ويمكن أيضاً أن يُقدم بعض الدفع الميكانيكي مباشرة

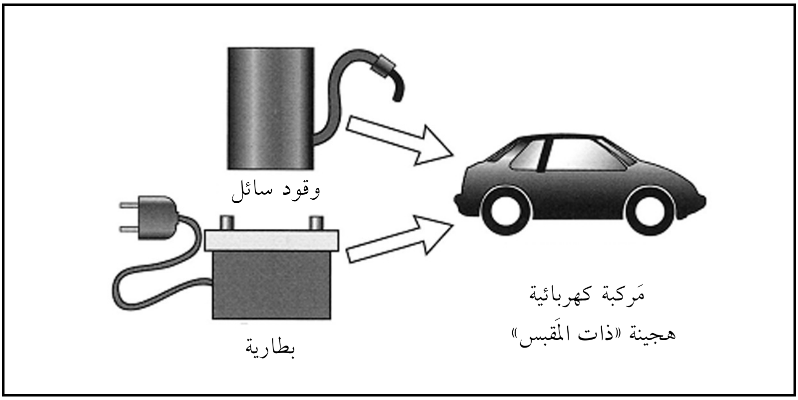


الشكل (9-8): عمل السيارة الكهربائية الهجينة «التسلسلي-المُتوازي».

إلى العجلات عبر علبة التروس. يَتم هذا النوع من العمل «التسلسلي-الموازي» بشكل غير مَلحوظ تقريباً من قبل السائق بواسطة نظام تحكم يقرر متى يتم تشغيل محرك الاحتراق الداخلي، ومتى يجب إيقافه، من دون أي تدخل من السائق. هناك فائدة رئيسة واحدة لهذا التصميم في نقل الحركة وهي أن محرك الاحتراق الداخلي يستطيع الآن العمل عند الظروف التصميمية الأكثر كفاءة، بشكل مستقل عن سرعة المركبة أو الحمل، وبذلك رفع الكفاءة الإجمالية لاستهلاك الوقود بشكل كبير. هناك أيضاً ميزة مهمة أخرى للسيارات الهجينة وهي استخدام «إعادة التوليد بالفرملة» التي تَستخدم المُولدة لامتصاص الكثير من طاقة الفرملة التي كانت تُبدّد طبيعياً على شكل حرارة بواسطة الفرامل، ومن ثم استخدام هذه الطاقة لشحن البطارية ثانيةً. نتيجةً لهذه الميزات التصميمية، يكون لدى السيارة الهجينة مدى أفضل باستهلاك الوقود (بشكل طبيعي) خلال القيادة ضمن المدينة بالمقارنة مع القيادة على الطرقات السريعة، ما يجعلها مناسبة خصيصاً للتنقل ضمن المدن. تم تطوير هاتين المَيزتين وتدقيقهما

بواسطة مهندسي السيارات بحيث وصلت كفاءة وقود السيارة الهجينة إلى حوالى 50 في المئة وهي أكبر من تلك العائدة للسيارة التقليدية المزوّدة بمحرك احتراق داخلي لوحده. يحب سائقو السيارات أيضاً قيادة سيارة هجينة لأن محركها الكهربائي قادر على توفير تسارع قوي، العائد إلى مميزات عزمه العالي عند السرعة المنخفضة. وقد تم إدخال السيارات الهجينة بنجاح إلى السوق، بدايةً بالسيارات الصغيرة، لكن التكنولوجيا تنتشر الآن إلى سيارات أكبر وإلى السيارات من النوع (Sport Utility Vehicles - SUV)، حيث إن الفائدة من توفير أكثر للوقود مرحبٌ بها بشكل خاص.

يمكن تصنيف التصميم الحالي للمَركبات بالنظم الهجينة «المستقلة عن الشبكة» أو «المعتمدة على ذاتها»، لأنها تتضمن نظام نقل حركة كهربائياً وبطارية تخزين، لكنها لا تزال تحصل على مجمل طاقتها الأولية من الوقود المحمول على متن المَركبة، ولا تحتاج إلى مَقبس أو مأخذ للربط بالشبكة الكهربائية لإعادة شحن البطارية. ومع التطورات المتوقعة في كثافة الطاقة للبطارية، والرغبة في تخفيض استخدام الوقود الأحفوري، يمكن أن تكون هذه المركبات ممهدة جيدة للانتقال إلى الجيل التالي للمركبات الهجينة؛ المسماة النظم الهجينة «المُرتبطة - بالشبكة»، في بعض الأحيان يُعرّف عنها أيضاً بالأنظمة الهجينة ذات «المَقبس». يبين الشكل (9-9) مُخططاً بسيطاً لهذه الفكرة، التي تشمل محاسن كل من المَركبات الكهربائية التي تعمل على البطاريات فقط والمَركبات الهجينة. ضمن هذه الفكرة التصميمية، سوف تكون علبة البطاريات في المَركبات المُختلفة عن الهجينة التقليدية أكبر بكثير، ويمكن شحنها بشكل كُلّي عندما تكون خارج الاستخدام بربطها بالشبكة الكهربائية العامة. وسوف يكون مُحرك الاحتراق الداخلي أصغر، وسوف يبقى يعمل على بعض أشكال الوقود السائل، كما هو مُبيّن في الشكل (9-9). بِهذه الطريقة يمكن أن تعمل المركبة لمدى قيادة أطول، ربما ما بين 20 و60 ميلاً



الشكل (9-9): السيارة الكهربائية الهجينة ذات المَقْبس الكهربائي.

(30 - 100 كيلومتر تقريباً)، كمركبة كهربائية بشكل تام، وسوف تستخدم مُحرك الاحتراق الداخلي لإعادة شحن البطارية فقط عندما يكون ضرورياً تجاوز هذه المسافة، أو ربما عندما يحصل تسلق هِضاب شديدة الانحدار. بالنسبة إلى كثير من السائقين، وبالتحديد لمُعظم المتنقلين بين المدن وضواحيها، سوف تكون السيارة قادرة على العمل كسيارة كهربائية على البطارية فقط في معظم الرحلات، ومن الممكن ربطها بمأخذ الشحن الكهربائي خلال الليل وبالطبع أيضاً عندما تكون متوقفة خلال النهار. إن التطوير الناجح للسيارات الهجينة ذات المَقبس ودخولها إلى الأسواق سوف يدل على بداية نموذج مهم وجديد للنقل يفصل المَركبات البرية عن الحاجة إلى استخدام الوقود النفطي، على الأقل خلال الأميال الرئيسة عند التنقل. عند الأخذ بالاعتبار السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة بالنسبة إلى هذا الاختيار، وإذا تم توليد الكهرباء بشكل أولي من مصادر طاقة أولية مُستدامة كالطاقة المتجددة أو النووية، عند ذلك يمكن للنقل البري أن يُصبح أيضاً مُستداماً ولن يستمر في كونه عاملاً مهماً في الإسهام بإنتاج غاز الدفيئة.

نَشر معهد بحوث الطاقة الكهربائية في الولايات المتحدة نتائج

دراسة (EPRI,2001) تُقارن الأداء لتصميمَيْ سيارة كهربائية هجينة ذات مقبس بسيارة كهربائية هجينة ذات نظام ذاتي مُستقل وسيارة تقليدية مُزودة بمحرك بنزين. نمذجت مجموعة الدراسة أداء سيارة نموذجية ذات حجم متوسط باستخدام برنامج مُحاكاة للسيارات (ADVISOR) طوّر بواسطة مختبر الطاقة المتجددة الوطني التابع لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة. إن التشكيلات الأربع المختلفة أطلق عليها على التوالي تسمية السيارة التقليدية (Conventional Vehicle - CV)، والسيارة الكهربائية الهجينة الذاتية (HEV)، ومع مدى ليس كله كهربائياً (HEV0)؛ وسيارتين هجينتين ذوات مقابس، واحدة ذات مدى كله كهربائي من 20 ميلاً (HEV20)، وواحدة ذات مدى كله كهربائي من 60 ميلاً (HEV60). وتم افتراض أن جميع السيارات الكهربائية الهجينة تَستخدم بطاريات هيدريد - معدن - النيكل الأكثر تطوراً (NiMH)، ونظام إعادة التوليد بالكبح، وأن يكون لديها أداء مماثل، مُتضمن حداً أدنى للسرعة العظمى 90 ميلاً في الساعة، وتسارع من 0 إلى 60 ميل/ ساعة خلال زمن أقل من 5.9 ثانية. تم افتراض أن لدى جميع السيارات خزيناً من البنزين كافياً لها لتوفر مدى من 350 ميلاً. إن ميزات التصميم الرئيسة للمَركبات المُختلفة مُلخصة في الجدول (9-3) الذي يُبين أن (HEV60) تتطلب سعة بطارية أكبر بكثير، لكن لديها مُحرك إحتراق داخلي أصغر مقارنةً بالتشكيلات الهجينة الأخرى أو المَركبة التقليدية (CV). ومن الممتع رؤية أنه على الرغم أن البطارية في (HEVs) تضيف كتلة معتبرة، فإن مجمل كتلة السيارة هي أقل من كتلة السيارة التقليدية، باستثناء الشكل (HEV60)، لكن حتى هذه المركبة تزيد كتلتها بـ 100 كيلوغرام فقط على السيارة التقليدية. يعود ذلك بشكل رئيس إلى المُحرك البنزيني الأصغر، وبالتالي الأخف، مع مجموعة نقل الحركة، المُستخدَم في السيارات الكهربائية الهجينة. ليس ما يدعو للدهشة، نسبة إلى توقعات أداء مشابهة مُعطاة، أن تكون مجمل المقدرة المُتوافرة من كلٍ من محرك

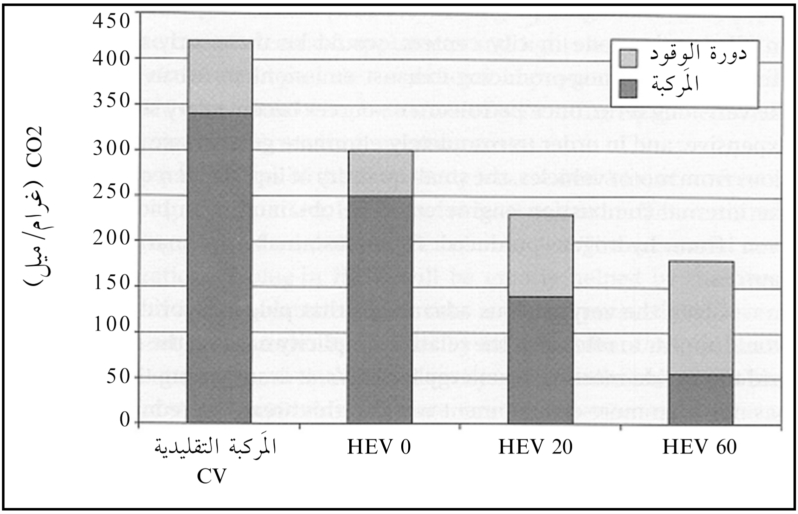
الوقود والمُحرك الكهربائي في مَركبات (HEVs) أقل بقليل فقط من تلك المُتوافرة من محرك سيارة تقليدية. إن القدرة المجزّأة بين محرك الوقود والمحرك الكهربائي هي متساوية تقريباً في ما يخص المَركبتين (HEV0) و(HEV20)، بينما في ما يخص المَركبة (HEV60) فإنها تمتلك محركاً كهربائياً قدرته حوالى ضعفَي قدرة مُحرك البنزين.

الجدول (9-3):

دراسة تصنيفات المَركبات من قِبل EPRI

السيارة ---->	CV	HEV 0	HEV 20	HEV 60
قدرة محرك البنزين (كيلو واط)	127	67	61	38
قدرة المحرك الكهربائي (كيلو واط)	-	44	51	75
سعة البطارية (كيلو واط ساعة)	-	2.9	5.9	17.9
كتلة المَركبة (كيلوغرام)	1682	1618	1664	1782

أخذاً بالاعتبار مجمل استهلاك الطاقة لجميع المَركبات، اعتمدت الدراسة طريقة «المصدر - إلى - عجلات»، وتضمنت الدراسة الطاقة المأخوذة من البنزين على متن المَركبة والطاقة المطلوبة لمعالجة النفط الخام لإنتاج البنزين، بالإضافة إلى الطاقة الكهربائية المطلوبة لإعادة شحن البطاريات بالنسبة إلى المركبات الهجينة ذات المقبس، (HEV60) (HEV20). وإن الطاقة المطلوبة لإنتاج البنزين من النفط الخام، والطاقة الأولية المطلوبة لإنتاج الكهرباء لإعادة شحن المَركبتين الهجينتين ذوات المقبس أُشير إليها «بدورة وقود» الطاقة. بالنسبة إلى الجزء من العملية في إعادة شحن البطارية، افترضت الدراسة أن الكهرباء تم توليدها من الغاز الطبيعي



الشكل (9-10): انبعاثات CO_2 **وفق دراسة** EPRI.

المصدر: EPRI (2001).

مقارنة الفوائد وتأثيرات خيارات المَركبات الكهربائية الهجينة

تقرير EPRI رقم 1000349

باستخدام محطة توليد كهرباء ذات دارة مركّبة، بكفاءة حرارية إجمالية تساوي 50 في المئة. تم حساب عوامل أداء مختلفة عديدة خلال المُحاكاة، لكن النتائج الرئيسة للدراسة يمكن تلخيصها بالعودة إلى الشكل (9-10)، الذي يبيّن انبعاثات غاز CO_2 لكل ميل، بافتراض مخطط زمني حقيقي لقيادة المَركبات.

إن إجمالي انبعاثات غاز CO_2 المبيّنة في الشكل (9-10) يُقدم صورة عن الكفاءة الإجمالية «المصدر - إلى - عجلات» للسيارة ونظام التزوّد بالوقود، بالإضافة إلى الإسهام الإجمالي في انبعاثات غاز الدفيئة. بالنسبة إلى المركبة التقليدية إن مجمل غاز CO_2 المنبعث لكل ميل مقطوع بالمَركبة يَتضمن ذلك المُتولد نتيجة مُعالجة النفط الخام إلى بنزين في دورة الوقود، بالإضافة إلى ذلك الناتج من

احتراق البنزين المُستخدم بواسطة محرك المركبة. تلك هي الحالة نفسها بالنسبة إلى المركبة الهجينة المستقلة، (HEV0)، لأن البنزين هو المستخدم فقط، وأن طاقة دورة - الوقود تمثّل النسبة نفسها من مجمل الطاقة المستخدمة في السيارة التقليدية. وبسبب الكفاءة الأعلى بكثير لنموذج (HEV0) مقارنةً بالمَركبة التقليدية، تم تخفيض الانبعاثات الإجمالية إلى 30 في المئة تقريباً. بالانتقال إلى المَركبة (HEV20)، فإن مجمل انبعاثات غاز CO_2 هي الآن أعلى بقليل من نصف انبعاثات المَركبة التقليدية، بينما بالنسبة إلى مَركبة (HEV60) فقد خُفِّضَت الانبعاثات إلى 60 في المئة تقريباً. ويمكن ملاحظة أنه في ما يخص المَركبة (HEV60) هناك حوالى 70 في المئة من مجمل الانبعاثات يتم إنتاجها من توليد الكهرباء، التي يفترض أن تستخدم الغاز الطبيعي كمَصدر أوّلي للطاقة. تشير هذه النتائج إلى أهمية الانتقال إلى استراتيجية المَركبة الهجينة ذات المقبس بالاقتران بنظام تزويد طاقة كهربائية مستدام على المدى البعيد. مثلاً، إذا كانت الكهرباء المستخدمة في سلسلة تحويل الطاقة الإجمالية مشتقة من اتحاد يضم الطاقة المتجددة مع الطاقة النووية، عندها سوف تكون الانبعاثات الوحيدة لغاز CO_2 عائدة إلى استهلاك البنزين على متن المَركبة، وإلى كمية صغيرة خلال مُعالجة الوقود، وبالتالي إن مجمل انبعاثات غاز CO2 بالنسبة إلى المَركبة (HEV60) سوف تكون حوالى 65 غرام/ ميل. سوف يعني ذلك أنه بالانتقال من قافلة مركبات تتألف جميعها من مَركبات تقليدية، إلى قافلة جميعها من مركبات (HEV60)، (أيضاً مع نظام كهربائي من دون انبعاثات)، سوف يخفّض ذلك انبعاثات غاز CO_2 من 420 غرام/ ميل إلى 65 غرام/ ميل، وهو ما يعادل انخفاض 85 في المئة. وهكذا إن انتشار استخدام المَركبات الهجينة ذات المَقابس، بالتزامن مع الانتقال إلى شبكة كهربائية من دون انبعاثات غاز CO_2، سوف يؤدي إلى طريق طويلة نحو الحد من إسهام غاز الدفيئة من المَركبات. هناك ميزة حسنة مهمة

أخرى للمَركبات (HEVs) ذات المَقابس، التي من المُتوقع أنها ستعمل على الأغلب بنظام كهربائي تام في مراكز المدن، يمكن أن تكون الحَد التام تقريباً لانبعاثات عوادم المَركبات المنتجة للضباب الدخاني في التجمعات المدنية. وعلى المدى الطويل جداً، عندما تصبح المَصادر النفطية نادرة جداً وغالية، ولكي نحدّ كلياً من انبعاثات غاز الدفيئة من محركات المَركبات، فإن الكمية الصغيرة من الوقود السائل المَطلوبة لمُحرك الاحتراق الداخلي يمكن الحصول عليها من وقود حيوي، أو حتى من هيدروجين تم إنتاجه من مصادر طاقة أوّلية مستدامة.

بناءً على الميزات الحسنة والواضحة جداً التي يمكن أن تقدمها المَركبات الهجينة ذات المَقابس، والبساطة النسبية في استخدام الشبكة الكهربائية لتوفير مُعظم الطاقة للمَركبات (HEVs)، من المُدهش أنه لم يحصل عمل لتطوير أكثر في هذا المجال. وإن التعقيد المُخفض وكلفة مَركبات (HEVs) ذات المَقابس مقارنةً، مثلاً، بمَركبات خلايا الوقود التي تعمل على الهيدروجين، من المفروض أن تجعلها مُناسبة أكثر كبدائل لمجموعة المَركبات الموجودة. كما إن التوسع المطلوب للشبكة الكهربائية في ما يخص البنية التحتية لنظم التزويد بالوقود، من المتوقع أن يكون أقل كلفة من مجمل التطوير لبنية تحتية جديدة للتزوّد بالهيدروجين. يُعتبر التوسع والتحديث في قدرة التوليد الكهربائي وشبكات التوزيع أمراً واضح المَعالم فعلاً، ويُمكن إدخال ذلك تدريجياً مع الزمن كلما ازداد عدد المَركبات الهجينة ذات المَقابس. إن نوع البنية التحتية المطلوبة في أماكن وقوف السيارات في مراكز المُدن يُشبه تماماً تلك المستخدمة مسبقاً في بعض المُدن ذات الطقس البارد، مثل إدمنتون في كندا، لتضمن أن السيارات تستطيع الإقلاع في ظروف ذات درجات حرارة تحت الصفر. حيث تم تزويد مآخذ كهربائية عند مواقف السيارات العديدة في المدينة في إدمنتون بحيث إن «السخانة» المُركّبة في مُعظم السيارات يُمكن أن توصل بالكهرباء طالما تقف السيارة لمدة

طويلة من الزمن عند درجات حرارة تنخفض إلى ما دون 30 درجة مئوية تحت الصفر. إذا وقفت السيارات في الليل خارج المنزل، كما هي في الأغلب الحالة في مناطق الضواحي، يتم عادةً وصل السيارات بالمآخذ لحماية مادة تبريد المُحرك من التجمد خلال ظروف الطقس الباردة جداً. سوف يُؤمّن توسع بسيط لهذا النوع من البنية التحتية مُجمل الطاقة الكهربائية اللازمة لإعادة شحن بطاريات الدفع طالما تقف السيارات في مراكز المدينة خلال يوم عمل نموذجي لمدة 8 ساعات. حتى إنه قد تكون هناك فائدة إضافية من مثل هذا النظام في تأمين مُعامل تحميل أفضل للشركات الكهربائية بتوزيع وانتشار الحمل الكهربائي بشكل متساوٍ أكثر خلال النهار. مع العديد من المُتنقلين بين المدينة وضواحيها الذين يقومون بوصل سياراتهم إلى الشبكة الكهربائية لإعادة الشحن خلال يوم العمل وفي الليل، سوف يَضمن الحمل الكهربائي الزائد الذي يكون عادةً منخفضاً في هذه الأوقات، الانتفاع الأفضل من القدرة العُظمى المتوافرة للتوليد للكهربائي. كذلك خلال فترات الازدحام الصباحية والمسائية، أي عندما يكون مُعظم المُتنقلين في حالة تنقل، سوف يَنخفض حمل إعادة الشحن خلال الفترات نفسها عندما يبلغ الاستهلاك المَنزلي ذروته بسبب استخدام الأجهزة الكهربائية والإضاءة خلال فترات الطعام. يمكن أن توفِّر هذه «التسوية في مستوى الحمل» تحسينات مهمة في مُعاملات الحمل، نتيجة وجود استخدام أفضل لمُعدات التوليد وتخفيض في تكاليف وحدة توليد الكهرباء.

لقد نتج من نشر دراسة معهد (EPRI) الكثير من الاهتمام في مركبات (HEVs) ذات المَقابس أو التي يمكن وصلها بالشبكة الكهربائية، وعلى الأقل هناك مُصنِّع واحد الآن يقوم بمحاولات لعدد قليل من المَركبات. وسوف يكون الانتشار التجاري الناجح لمَركبات (HEVs) ذات المقابس مدعوماً بِشكل كبير بتطوير بطاريات أفضل، وكون ذلك يُتابع عن طريق العديد من مختبرات الأبحاث الحكومية، بالإضافة إلى المصنِّعين. وأصبحت الآن بطاريات هيدريد

– معدن – النيكل، بكثافة طاقة وطاقة نوعية حوالى مرتين مما لدى البطاريات الرصاصية – الحمضية، بالمستوى الأكثر تطوراً من التكنولوجيا بالنسبة إلى مَركبات (HEVs) من دون مقابس كهربائية كسيارة تويوتا بريوس الهجينة الناجحة جداً. على المدى الأطول، من أجل الاستعمال في مَركبات (HEVs) ذات المقابس، يمكن استبدال هذه البطاريات ببطاريات أيونات الليثيوم (Lithium Ion Batteries)، أو بتكنولوجيا بوليمر الليثيوم، أو حتى بتكنولوجيا كبريت الليثيوم الجديدتين اللتين هما بمرحلة مبكرة من التطوير، لكنهما تُظهران وعداً كبيراً.

بالنسبة إلى النقل المحلي في مراكز المدن، إن الارتفاع المحتوم في أسعار البنزين والديزل، بالإضافة إلى تكاليف أعلى لمواقف المركبات وللازدحامات المرَوّجة لعدم تشجيع استخدام السيارات الخاصة، من المَفروض أن يُؤدي أيضاً إلى كون النقل العام الجماعي بديلاً أكثر انتشاراً وشعبيةً. في مدن ذات عدد سكاني كبير، وكثافة سكانية عالية، سوف يكون ذلك عادةً على شكل نقل عام موجَّه مثل قطارات الأنفاق تحت الأرض، أو نظام نقل سككي خفيف مُشابه باستخدام مسار توجيه مرفوع. إن الكهرباء هي الاختيار الواضح من أجل طاقة الدفع لكلا النظامين، وإذا تم الحصول عليها على المدى الطويل من مصادر طاقة أولية مستدامة، عندها سوف توفِّر أيضاً إسهاماً رئيساً في تخفيض انبعاثات غازات الدفيئة، بالإضافة إلى تخفيض مستويات التلوّث في المدن. في مدن أصغر، تكون عادةً الباصات التي تعمل على الديزل الدعامة الأساسية لأنظمة النقل العامة في هذه المدن، لكن ذلك لن يكون الخيار المُستدام على المدى الطويل. مع الزمن يمكن استبدالها بيسرٍ فعلاً، إما بالترامات من خلال استخدام مسار توجيه مرتفع عن الطريق، أو بباصات الترولّي المغذّاة بواسطة خطوط مرفوعة في الهواء، بشكل مماثل لتلك المستخدمة من أجل تغذية القطارات الكهربائية. تم

استخدام باصات الترولّي هذه بنجاح لسنوات عديدة، خصوصاً في مدن مثل فانكوفر بكندا، التي لديها تكاليف كهرباء منخفضة جداً، لكن من المفروض أن تكون هذه الباصات مناسبة بشكل مُتزايد كبديل لباصات الديزل أو السيارات. كذلك، سوف يؤدي ذلك إلى بنية تحتية للنقل العام في المدن أكثر استدامة إذا تم توليد الكهرباء بشكل سائد من مصادر مستدامة كالطاقة المتجددة أو الطاقة النووية.

9. 3. القطارات والطائرات والسفن

إن وقود المستقبل في ما يخص النقل السككي هو أيضاً بشكلٍ واضح الطاقة الكهربائية، وعلى المدى الأبعد من المحتمل أن يصبح ذلك أكثر استدامة مما هو حالياً في معظم البلدان. ومن المتوقع استخدام نظام توليد كهربائي مستدام حقيقي مع بعض الاندماج بين الطاقة المتجددة والطاقة النووية، أو ربما حتى مع الوقود الأحفوري مع حجز الكربون وتخزينه. يعتبر تزويد السكك الحديد بالكهرباء مؤسساً بشكل جيد مسبقاً، ويستخدم ليخدم كلاً من حركة مرور المسافرين ونقل البضائع في مناطق من العالم ذات كثافات حركة مرورية عالية. مع زيادة أسعار وقود الديزل، والقلق حول تَسخين الأرض بسبب غازات الدفيئة، سوف يكون هناك حافز للتحول من قاطرات كهربائية نوع «ديزل- كهرباء» إلى نوع «موصول - بالشبكة». وإنه من غير الواضح تماماً كيف يمكن أن يبدو مصدر وقود مستدام من أجل كل من قطاعي النقل الجوي والنقل البحري، حيث إن هذين القطاعين ليس من السهل ربطهما بالكهرباء. وفي كلتا الحالتين فإن كثافة الطاقة العالية جداً، وسهولة التخزين، التي يقدمها الوقود السائل من الصعب الحصول عليها بطريقة أخرى.

كون الوقود السائل مُتوقعاً بالاستمرار لأن يكون الخيار العملي الوحيد لتزويد السفن والطائرات، يمكن أن تستمر هذه الوسائط باستخدام الوقود الأحفوري السائل على شكل وقود ديزل، أو زيت نفطي ثقيل، أو وقود الطائرات النفاثة. وإذا تم تحويل نظام النقل

البري، ومن ضمنه النقل السككي، اللذين يشكّلان معاً 85 في المئة من استخدام طاقة النقل، ليعملا بشكل كبير على طاقة كهربائية مُستدامة، أو حتى على الهيدروجين المُنتج بطريقة مستدامة، بعد ذلك سيكون استهلاك الطاقة من قبل القطاعين الجوي والبحري جزءاً صغيراً من مُجمل استهلاك الطاقة العالمي. وبالتالي من المحتمل أن يستمر هذين القطاعين بالعمل على وقود سائل مشتق من وقود أحفوري، من دون الحاجة إلى حجز الكربون وتخزينه، إذ إن إسهامهما في انبعاثات غازات الدفيئة سيكون ضئيلاً جداً. إذا تم الوصول إلى إجماع عالمي (من غير المُحتمل أن يحصل ذلك) بأنه ينبغي ألا يكون هناك غازات دفيئة منبعثة في أي مرحلة من سلسلة تحويل طاقة، فمن المحتمل أن يكون الوقود الحيوي أو الهيدروجين السائل البديل الوحيد من أجل هذه القطاعات. ويمكن أن يكون الوقود الحيوي عبارة عن ديزل حيوي من أجل الاستخدام في المَركبات البحرية، ويمكن أن يُستخدم هذا أيضاً في المُحركات النفاثة مع بعض أعمال التطوير الهندسية. هناك مسار آخر محتمل لوقود حيوي يمكن أن يكون الميثانول أو الإيثانول من أجل الاستخدام في محركات المَراكب البحرية ذات شمعات الاحتراق، لكن الوقود الكحولي ليس مناسباً جداً بالنسبة إلى الطائرات، حيث إن كثافة الطاقة لهذا الوقود منخفضة جداً. مثلاً، إن كثافة الطاقة النوعية (الوزنية) للميثانول هي حوالى نصف تلك الموجودة لدى وقود الطائرات النفاثة، الذي يعني أن وزن الميثانول المطلوب سوف يكون ضعف وزن وقود الطائرات الحالي لإعطاء منتوج الطاقة نفسه. وهكذا، بالنسبة إلى الطائرة حيث يكون فيها حمل الوقود جزءاً مهماً من مجمل وزنها عند الإقلاع، إن استخدام الميثانول كوقود سوف يَحد بشكل كبير من الحمل المفيد.

إن بديلاً ذا مدى أطول، ومن المحتمل أكثر غلاءً، قد يكون استخدام الهيدروجين في كل من الطائرات والسفن. مع أن بعض

التغيرات في المحرك سوف تكون مطلوبة بالنسبة إلى محركات الطائرات والمَراكب البحرية، فسوف تكون هذه التغيرات طفيفة، وفي الحقيقة، قامت القوات الجوية في الولايات المتحدة بتنفيذ أول طيران لطائرة بمحرك واحد يعمل على وقود الهيدروجين عام 1956. للاستخدام في الطائرة يجب أن يكون الوقود بالتحديد هيدروجيناً مُسالاً تقريباً، حيث إن مشاكل تخزينه عند درجة حرارة حوالى 250 درجة مئوية تحت الصفر، سوف تكون نوعاً ما ملطفةً عند درجة حرارة عادية حوالي 60 درجة مئوية تحت الصفر عند ارتفاع طيران 35000 قدم. للهيدروجين السائل أيضاً طاقة نوعية عالية (طاقة بوحدة الكتلة)، التي سوف تخفض من وزن الوقود المطلوب بعامل 2.5 تقريباً بالمُقارنة مع وقود الطائرات النفاثة. وسوف يكون لوزن الوقود المُخفض حسنة واضحة كوقود للطائرة، لكن تلك الميزة تم إزاحتها بسبب كثافة الطاقة المنخفضة (الطاقة بوحدة الحجم) للهيدروجين السائل بالمُقارنة مع وقود الطائرات النفاثة. والحجم (وبذلك حجم خزان الوقود) المَطلوب لتخزين الهيدروجين السائل سوف يكون حوالى أربع مرات أكبر من حجم وقود الطائرة النفاثة. مثلاً، بَيّنت دراسات أعدتها (NASA) أن الحيز الإضافي، وبالتالي وزن هيكل الطائرة المَطلوب من أجل خزانات وقود أكبر سوف يلغي بشكل كلي المحاسن الناتجة من وزن الوقود المُخفض. يمكن أيضاً بسهولة استخدام الهيدروجين السائل من أجل دفع السفن، بصورة مشابهة للطريقة التي يستخدم فيها الآن الغاز الطبيعي السائل لتزويد حاملات الغاز المُسال (LNG) بالوقود. إن الحجم الإضافي المطلوب بالنسبة إلى وقود الهيدروجين لن يكون سلبياً عند استخدامه في السفن التي لديها نسبة أعلى لحجم الشحن إلى حجم الوقود مما هو عليه الحال بالنسبة إلى الطائرات.

إن فكرة طائرة تعمل على وقود الهيدروجين السائل دُرست بشكل جدي خلال فترة 3 سنوات بين عامي 2000 و2003 بواسطة

تحالف من شركة إيرباص (Airbus) وعدد من شركات صناعة الطيران الأوروبية الأخرى، وكان التصميم الناتج مدعواً (Cryoplane) بسبب الخزانات ذات درجة الحرارة المُنخفضة جداً التي سوف تستخدم لتخزين الهيدروجين السائل عند درجة حرارة 250 درجة مئوية تحت الصفر. تمت دراسة أشكال عدة مُختلفة تراوحت من طائرة نفاثة صغيرة الحجم إلى طائرة ركاب ضخمة بحجم الإيرباص (A380). وَجد المشاركون في الدراسة أن فكرة طائرة مزوَّدة بوقود الهيدروجين كانت ذات جدوى، وأن المُحركات النفاثة يمكن أن تعدّل لتعمل على وقود الهيدروجين السائل من دون انخفاض بالكفاءة. تم تحديد مواقع مختلفة لخزانات الوقود في طائرات من أحجام مُختلفة تمت دراستها، وقد وُجد أن تشكيل طائرات تطير مسافات طويلة بخزانات وقود ذات درجة حرارة مُنخفضة جداً (Cryogenic) مركّبة في جزء جسم الطائرة العلوي المُطَوَّل في هيكل الطائرة، هو اختيار مُحتمل.

المراجع

Conferences

Rovera, G. "Potential and Limitations of Fuel Cell in Comparison with Internal Combustion Powertrains." Paper presented at: Internal Combustion Engine (ICE), Capri, Italy, 2001.

Reports

Electric Power Research Institute (EPRI) (2001). "Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options." Electric Power Research Institute Report 1000349.

Websites

Toyota Motor Corporation (2005). <http://www.toyota.com/>.

US Department of Energy (2005). <http://www.energy.gov/>.

US Department of Energy. Argonne National Laboratory (2005). <http://www.anl.gov>.

World Energy Council (2005). <http://www.worldenergy.org/wec-geis/default.asp>.

10 ـ تحقيق توازن طاقة مُستدام

درسنا في الفصول السابقة الطلب الحالي على الطاقة ونماذج التزوّد بها، بالإضافة إلى بعض التوقّعات لطلب الطاقة العالمي في المُستقبل. بعد ذلك ناقشنا حقيقة أن كل مُتطلبات الطاقة لدينا يجب أن تُلبى في النهاية من خلال دمج ثلاثة مصادر طاقة أوّلية: الوقود الأحفوري والطاقة المتجدّدة والطاقة النووية. ومع تزايد الاهتمام بالتأثيرات البيئية لاستخدام الوقود الأحفوري، إضافة إلى الغموض حول التوفر طويل - الأمد لهذه الأنواع من الوقود، خصيصاً النفط الخام، كان العمل من أجل الاستكشاف اللاحق لاستراتيجيات مصادر طاقة بديلة الهم الأساسي للمعنيين بالأمر. وقد ناقشنا الحاجة إلى التحرك، على المدى - الطويل، من الاعتماد السائد على الوقود الأحفوري لتقديم حوالى 80 في المئة من متطلبات مجمل الطاقة لدينا، إلى الاعتماد على مزيج من مصادر طاقة أكثر استدامة. وتابعنا مناقشة التوقعات من أجل بعض البدائل للوقود الأحفوري بواسطة حجز وتخزين أكسيد الكربون، على الرغم من أن التكنولوجيا لفعل ذلك في مرحلة مبكرة من التطوير. أخيراً، نأمل بأن التحرك بعيداً من الوقود الأحفوري يمكن أن يحصل نتيجة التغيير من الوقود النفطي إلى كهرباء لتغذية معظم حاجات نظم النقل لدينا. وفي هذا الفصل الأخير سوف ندرس كيف أن كل هذه الأفكار يمكن أن تتلاقى معاً، ونرى كيف أن خليطاً من مصادر الطاقة الأوّلية يمكن أن يتطوّر على مدى باقي القرن الواحد والعشرين. وأن التغيّرات في هذا الخليط مع الزمن سوف تؤدّي ليس فقط إلى تحسينات تكنولوجية وتخفيضات في

كلفة بدائل الطاقة هذه، لكن أيضاً إلى تطوير معقول للطاقة والسياسات البيئية في مختلف أنحاء العالم.

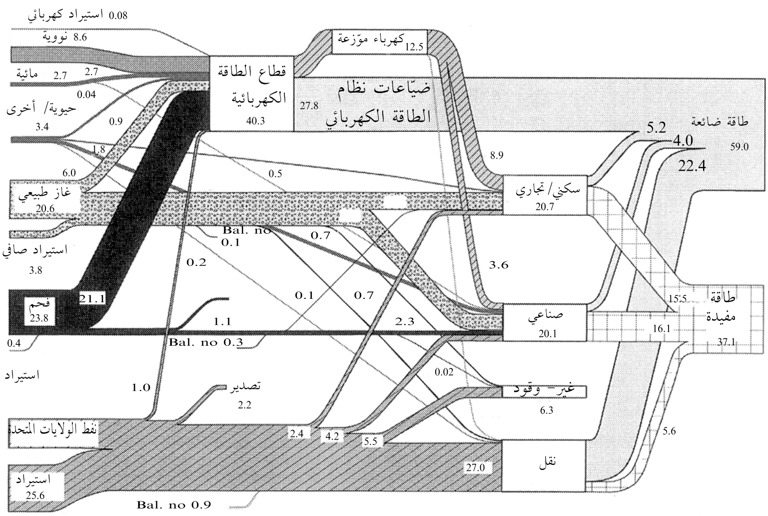
إن الهدف من أي خطة للطاقة، محلية، أو قومية، أو دولية، هو تقديم توازن معقول بين الطلب على الطاقة ومخزونها في كل القطاعات الاقتصادية. وكلمة «معقول» يمكن تفسيرها بالطبع بشكل مختلف بحسب الأشخاص المعنيين بهذا التعبير، فبالنسبة إلى المستهلك، الذي تمثّل فاتورة الطاقة المستمرة بالارتفاع أحد همومه اليومية، يمكن تفسير كلمة «بكلفة معقولة» أو أسعار متناسبة مع الدخل. أما بالنسبة إلى مُختص بالبيئة أو مناصري البيئة، فيمكن أن تفسر كلمة «معقول» بما لا يقل من الاعتماد الكلّي على الطاقة المتجددة لتلبية كل حاجاتنا من الطاقة تقريباً. وأخيراً، بالنسبة إلى رئيس شركة طاقة عالمية يمكن تفسير كلمة «معقول» بالأسعار التي تمكّن هذه الشركة من الحصول على أرباح جيدة باعتبار أنها تستثمر مبالغ كبيرة لإيجاد مصادر كربوهيدراتية جديدة، أو لتطوير تكنولوجيا جديدة تهدف إلى تخفيض الاعتماد على الوقود الأحفوري. والنتيجة النهائية، كما هو الحال في معظم مسائل السياسة العامة، هي عادةً الحل الوسط بين مختلف القضايا التي تؤثر في مخزون الطاقة. ويسعى المسؤولون والشركات باستمرار إلى التطوير سياسات تؤدي إلى إيجاد مخزون مستمر للطاقة عند أسعار معقولة، وفي الوقت ذاته تخفيض تأثيرات استخدام الطاقة في البيئة.

لدراسة توازن الطلب على الطاقة بتفصيل أكثر سوف نعود إلى مخطط تدفّق الطاقة، أو مخطط «سانكي» الذي قدمناه في الفصل الثاني. ويمكن استخدام هذا المخطط الغني جداً بالمعلومات لمتابعة كيف يتم تحويل الطاقة وتوزيعها من المصدر الأوّلي حتى نقطة الاستهلاك النهائية. ويمكن استخدام مخطط «سانكي» لتصوّر هذه التدفّقات المعقدة للطاقة، سواء كان ذلك في بلد واحد أو في أمم متعددة، أو حتى لبحث تدفّق الطاقة عالمياً.

وقد تفيد هذه المخططات بتقديم صورة سريعة لكمية الطاقة الأوّلية التي تصبح «طاقة مفيدة» في تزويد نقاط استهلاك مختلفة، وكمية الطاقة «الضائعة» التي تصبح في النهاية مبدّدة، عادةً على شكل حرارة ضائعة. وهناك توضيح في هذا النوع من المخطّطات للاقتصاد الإجمالي للولايات المتحدة، الذي تم إعداده بواسطة مختبر لورانس ليفرمور العائد لوزارة الطاقة في الولايات المتحدة، وهو مبيّن في الشكل (10-1) (US DOE, 2005). إن مخططات «سانكي» الموجودة في وزارة الطاقة في الولايات المتحدة تغطي سنوات عدة، والمخطّط المُبيّن في الشكل (10-1) للعام 2002 مفيد خصوصاً لأنه يوضح إجمالي كمية الطاقة الأوّلية المستهلكة، 103 إكساجول (10^{18} جول)، متضمّنة الطاقة المستهلكة في مختلف الاستخدامات: مثل البترول المستخدم في المواد الأوّلية الكيميائية وإنتاج الإسفلت. ومن السهل جداً تحديد النسبة المئوية التقريبية لتدفّقات الطاقة المتوجهة إلى نقاط الاستهلاك المختلفة من خلال هذه المخططات، إضافة إلى الحرارة الضائعة أو «الطاقة المبدّدة». مثلاً، يبيّن المخطّط بوضوح التدفّقات المتنوعة للطاقة الأوّلية المستخدمة لتوليد الكهرباء، حيث المصدر الأكبر هو الفحم الحجري الذي ينتج 21.1 إكساجول، ثم دَخْل طاقة أوّلية على شكل طاقة نووية 8.6 إكساجول ، و6.0 إكساجول من الغاز الطبيعي، و2.7 إكساجول من الطاقة المائية. إن 12.5 إكساجول فقط تصبح في النهاية كهرباء من إجمالي الطاقة التي هي 40.3 إكساجول المستخدمة لتوليد الكهرباء، بينما 27.8 إكساجول تعتبر طاقة ضائعة من محطات الطاقة الحرارية. ويمكن ملاحظة أن الأمر مماثل في قطاع النقل الذي يعتمد بشكل رئيس على البترول كمصدر، فمن أصل 27.9 إكساجول من الطاقة الأوّلية المستخدمة، هناك 20 في المئة فقط، أو حوالى 5.6 إكساجول يتم تحويلها إلى «طاقة مفيدة» لتشغيل جميع السيارات، والشاحنات، والسفن، والطائرات. وتستخدم 6.3 إكساجول من مخزونات البترول

التوجه في جريان الطاقة للولايات المتحدة - 2002

تدفّق الطاقة الكلي 103 إكساجول (10^{18} جول).



الشكل (10-1): مخطط تدفّق الطاقة للولايات المتحدة: 2002.

المصدر: مشتقة من وزارة الطاقة في الولايات المتحدة، إدارة معلومات الطاقة. Annual Energy Review 2002, DOE EIA - 0384 (2002). Washington, DC, October 2003.

أيضاً، في تطبيقات غير متعلقة بالوقود، مثل إنتاج البلاستيك، ومواد صناعية أخرى. وبشكل إجمالي، فإنه من الـ 103 إكساجول لإجمالي الطاقة الأوّلية المستخدمة في الولايات المتحدة في عام 2002، هناك 37.1 إكساجول فقط كانت «طاقة مفيدة» لتوفير حرارة وطاقة إلى المنازل والمصانع والمركبات و6.3 إكساجول كانت مستخدمة في تطبيقات غير متعلقة بالوقود، بينما حوالى 59.3 إكساجول كانت «طاقة ضائعة»، أو طاقة مبدّدة، والتي تعتبر بشكل رئيس حرارة ضائعة.

يبيّن الشكل (10-1) أن الطاقة المتجددة تقدم فقط نسبة مئوية

من إجمالي متطلبات الطاقة الأوّلية في الولايات المتحدة، حيث العنصر الأكبر 2.7 في المئة تقريباً من إجمالي الطاقة مشتق من الطاقة الكهربائية المائية. وهناك 3.4 في المئة أخرى تقريباً من الطاقة الأولية مشتقة من الكتلة الحيوية وأشكال «أخرى» من الطاقة المتجددة، علماً بأن الجزء الأكبر من طاقة الكتلة الحيوية يستخدم في العلميات الصناعية، مثل صناعة الورق. في عام 2002 كان هناك حوالى 0.9 في المئة فقط من إجمالي الطاقة الأوّلية تم الحصول عليها من مصادر متجدّدة غير الطاقة الكهربائية المائية لتوليد الكهرباء. ويوضح الشكل أيضاً الاعتماد الكبير لمعظم الدول الأوروبية على البترول، أو النفط الخام، وبشكل رئيس كمواد أولية لتزويد احتياجات طاقة النقل، وعلى الفحم الحجري، الذي يستخدم بشكلٍ رئيس لتوليد الكهرباء. وفي الولايات المتحدة، كما هو الحال في معظم دول العالم المتقدّم، يتم استيراد كثير من الطاقة الأولية على شكل نفط خام، ما يؤدّي إلى الاهتمام بضمان استمرار الطاقة، بالإضافة إلى الاهتمام الحديث العهد حول انبعاثات غازات الدفيئة، ما يدفع معظم البلدان لتدرس بجدية بدائل عن الاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري كشكل سائد من الطاقة الأولية. يمكننا ملاحظة من الشكل (1-10)، أنه في العام 2002 حوالى 90 في المئة من إجمالي الطاقة الأولية في الولايات المتحدة كانت مشتقة من الوقود الأحفوري على شكل فحم حجري، نفط خام، أو غاز طبيعي، وجميع هذه الأنواع تؤدي إلى إنتاج أكسيد الكربون، المصدر الأكثر أهمية لانبعاثات غازات الدفيئة.

في الجزء الباقي من هذا الفصل سوف ننظر إلى الوراء على بعض البدائل عن استخدام الوقود الأحفوري التي ناقشناها، لندرس كيف يمكننا أن نبدأ الانتقال إلى توازن طلب - مخزون للطاقة أكثر استدامة.

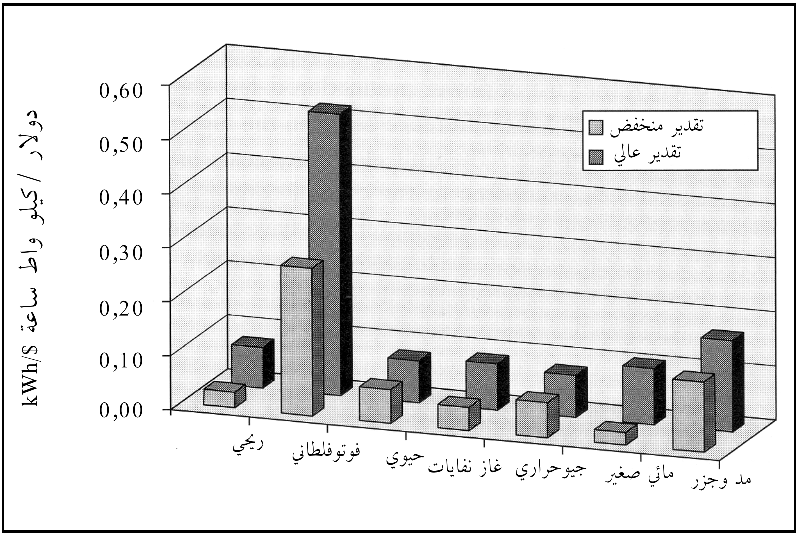
إن التحرك بعيداً من الوقود الأحفوري لتأمين معظم احتياجاتنا

الأولية من الطاقة يعني الاعتماد بصورة أكبر على الطاقة المتجدّدة و/ أو الطاقة النووية حيث يكون ذلك ممكناً. هناك طريقة لتحقيق ذلك، كما ناقشنا في الفصل التاسع، وهي بتخفيض اعتمادنا الكلي تقريباً على النفط الخام لتأمين طاقة النقل، وذلك بواسطة الانتقال إلى الكهرباء بدلاً من منتجات النفط المعالج كحامل رئيس لطاقة النقل. ويشير هذا الأمر إلى بداية الانتقال من «اقتصادنا الكربوهيدراتي» الحالي إلى «اقتصاد كهربائي» جديد. وكما رأينا في الفصل الرابع، يعتبر النقل مسؤولاً عن أكثر من 25 في المئة من إجمالي استهلاك الطاقة الأوّلية، حيث إن الانتقال الكبير إلى «المركبات الهجينة ذات المقبس» التي بحثناها في الفصل التاسع، يتطلب توسعاً كبيراً في إنتاج الكهرباء. وإذا كان هذا التوسع بشكل رئيس من الوقود الأحفوري، من دون استخدام حجز وتخزين الكربون، لذا سوف يكون هناك تخفيض صغير في إنتاج غازات الدفيئة. إن تطوير مصدر كهرباء مستدام بشكل حقيقي، قادر على تأمين احتياجات الطاقة لقطاع النقل، بالإضافة إلى قطاعات اقتصادية أخرى، سوف يتطلب انتقالاً إلى بعض الدمج للطاقة المتجددة، والطاقة النووية والفحم النظيف، مع حجز وتخزين للكربون، كمصادر أوّلية. والتنوّع الفعلي لهذه المصادر الذي يتطور على مدى يتراوح بين 50 و100 سنة مقبلة سوف يعتمد على تطوير المصادر التكنولوجية وتكاليفها وقبول عامة الناس، إذ إنها ستؤثر جميعها في سياسات الطاقة المستقبلية. على سبيل المثال، رأينا أن الطاقة المتجددة يتم استخدامها بشكلٍ متزايد لتوليد الكهرباء، لكن انخفاض «كثافة الطاقة» في معظم أشكالها المتجددة أدت إلى تكاليف عالية وتأثيرات مهمة في استخدام الأراضي. وقد أسهمت التطورات التقنية المطّردة في تخفيض تكاليف بعض أشكال توليد الكهرباء المتجددة مع كون طاقة الرياح السبّاقة كمصدر مهم للطاقة الكهربائية.

تم وضع دراسة التكاليف النسبية لأشكال عديدة لتوليد الكهرباء

من الطاقة المتجدّدة في إطار مشروع «أطلس» للاتحاد الأوروبي في عـام 1996 (European Atlas Project 2005). إن الـمـدى الـمـقـدّر لتكاليف الكهرباء المتجدّدة في عام 2005 مبيّن في الشكل (10-2) حول التكنولوجيا الرئيسة المدروسة. إن كلاً من التقدير العالي والتقدير المنخفض لكلفة الكهرباء (محوّلة من يورو إلى دولار/ كيلو واط ساعة) مبيّنان في الشكل، والمدى بين كل التغيّرات في كل تكنولوجيا تمت دراستها. بعض التكنولوجيات، كتكنولوجيا طاقة الرياح، وتكنولوجيا توليد طاقة التحويل الفولتضوئي الشمسي (PV)، وتكنولوجيا التوليد الكهرومائي تتأثّر بشكل خاص بحسب الموقع المختار، أما المدى بين تقدير الكلفة المنخفضة والكلفة العالية فهو كبير في هذه الحالات. وفي الحالات الأخرى، كطاقة الكتلة الحيوية والطاقة الجيوحرارية، فإن كلفة إنتاج الطاقة هي أقل تأثّراً في الموقع، وإن الاختلاف بين تقديرات الكلفة المنخفضة والكلفة العالية يبقى أقل بكثير.

إن تكاليف الوحدة الكهربائية (الكيلو واط ساعة) لكل واحدة من التكنولوجيات يمكن مقارنتها مع كلفة توليد الطاقة تقليدياً بواسطة الفحم المطحون (PF)، الذي رأينا في الفصل الثامن أنها 0.042 دولار لكل كيلو واط ساعة تقريباً، من دون ضريبة على الكربون أو شكل آخر من عقبات غازات الدفيئة. يمكن ملاحظة من الشكل (10-2)، أن كلاً من توليد طاقة الرياح والطاقة المائية الصغيرة يمكن أن تكون منافسة جداً لتوليد الطاقة من الفحم الحجري عند انخفاض تقديرات الكلفة. إن استخدام طاقة غازات النفايات والكتلة الحيوية أو الطاقة الجيوحرارية من أجل توليد الكهرباء تحت ظروف معيّنة وبخاصة في مواقع مفضلة، يمكن أن تصل إلى تكاليف التوليد بواسطة الوقود الأحفوري. ومن ناحية أخرى، فإن توليد الطاقة الشمسية الفولتضوئية على الرغم من أنه يستفيد من التخفيض المهم في تكاليف الإنشاء، ومن طاقة المد والجزر فهو لا يعتبر منافساً لتوليد



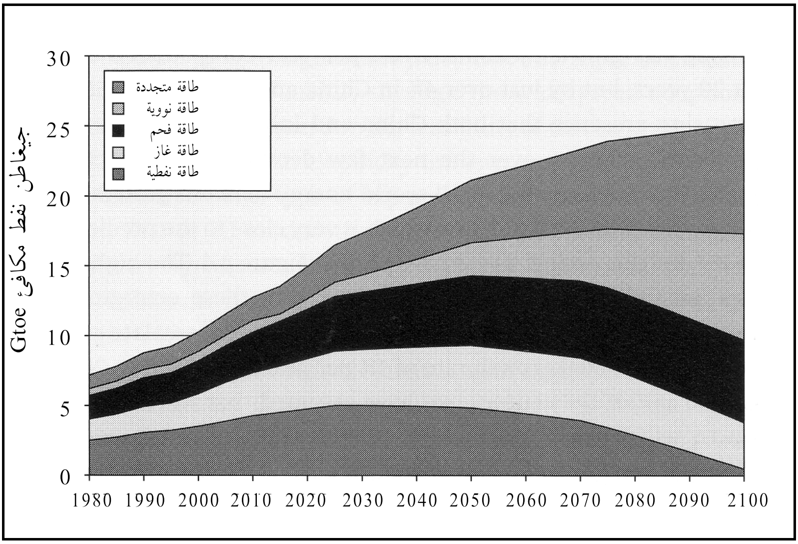
الشكل (10-2): تقديرات الاتحاد الأوروبي لتكاليف الكهرباء المتجددة في 2005
المصدر: مشروع أطلس الأوروبي EU.

الطاقة تقليدياً بواسطة الفحم الحجري حالياً. وهكذا، يبدو أن هناك توقعاً كبيراً لانتشار أكبر للطاقة الأوّلية المتجدّدة لتوليد الكهرباء، خصوصاً إذا كانت الفائدة من الحد من انبعاثات غازات الدفيئة تؤخذ بالحسبان. وعندما يزداد هذا الانتشار، يمكن إعاقة نموّ الكهرباء المتجدّدة بواسطة الاعتراض العام المتنامي المترافق مع مساحات الأرض الكبيرة المطلوبة بواسطة مصادر طاقة ذات كثافة منخفضة مثل طاقة الرياح(*). أصبح هذا الأمر محط اهتمام في أوروبا مثلاً، حيث

(*) إن المساحة المطلوبة لتحويل طاقة الرياح هي مساحة شاقولية مركزها على رأس التوربين الرياحي وليست مساحة أرض فعلية مقارنةً بما تتطلبه ألواح الطاقة الشمسية. أما من أجل تطوير المزارع الرياحية فيحتاج ذلك إلى مساحات من الأراضي ربما تكون كبيرة، لكن معظم هذه الأراضي ربما تكون غير صالحة للزراعة أو كمناطق سكنية. وإذا كان غير ذلك، ففي هذه الحالة لا يزال من الممكن استخدام هذه الأراضي من أجل الزراعة والرعي والأبنية الصناعية أيضاً.

إن الاحتجاجات من مجموعات ريفية محلية واجهت طروحات مشاريع جديدة من أجل تطوير مزارع رياحية ضخمة. تكتسب هذه الاحتجاجات بازدياد اهتمام عامة الناس والسياسيين في المملكة المتحدة، وفي ألمانيا، التي تعتبر المُنتج الأكبر لطاقة الرياح في العالم، حيثُ يدّعي المشاركون في الحملة أن المزارع الرياحية الكبيرة تخرّب مساحات واسعة من الجمال الطبيعي. إن هذه الأنواع من الحملات، بالمشاركة مع الحالة المتقطعة لمصادر الطاقة المتجددة، كما ورد في الفصل السابق، من المتوقع أن تحد من دخول الطاقة المتجددة إلى مزيج توليد الكهرباء.

كما رأينا في الفصل الثامن، هناك أيضاً اهتمام متزايد للشركات الكهربائية والحكومية في الطاقة النووية كمصدر نظيف للكهرباء. وهناك إدراك مُتنام بأن الطاقة النووية يمكن أن تكون الطريقة الأكثر أهمية لتخفيض تأثيرنا في المناخ بالعالم، والقبول العام للطاقة النووية يبدو أيضاً في تحسن. إن دولاً عديدة يمكن أن تنظر إلى فرنسا كمثال، حيث يتم فيها توليد معظم الكهرباء بواسطة محطات توليد نووية بمعارضة قليلة جداً من عامة الناس. وهناك سيناريو واحد يمكن أن نتخيّله من أجل المستقبل، وهو انتقال طويل - الأمد من منتجات نفطية معالجة إلى الكهرباء كحامل طاقة مسيطر. وإن الانتقال بعيداً من الاعتماد بشكل سائد على الكربوهيدرات كمصدر أوّلي للطاقة، نحو استخدام أكبر للطاقة المتجدّدة والطاقة النووية لتوليد الكهرباء، يمكن أن يقود إلى مستقبل طاقة أكثر استدامة. ومن المحتمل أن تكون تأثيرات ذلك مرئية بشكل أكثر وضوحاً في قطاع النقل، حيث إن الكهرباء يمكن أن تحل محل الوقود الكربوهيدراتي السائل كحامل مفضل للطاقة، كما ناقشنا في الفصل التاسع. ويمكن استخدام هذه الأفكار لنتأمل كيف أن مزيج الطاقة الأوّلية يمكن أن يتغير على مدى المئة سنة القادمة، كما هو موضح في «سيناريو الطاقة النووية والطاقة المتجددة» المحتمل في الشكل (10-3)، يوضح هذا



الشكل (10-3): مخزون الطاقة الأولي العالمي - «سيناريو الطاقة النووية والمتجددة».

الشكل نوع التوقعات التي يمكن أن توضح ببساطة بافتراض معدّلات نمو معقولة ظاهرياً من أجل كلٍ من المصادر الأوّلية الثلاثة: الوقود الأحفوري والطاقة المتجددة والطاقة النووية. إن الطلب المتوقع على الطاقة، بمليارات الأطنان من النفط المكافئ (Gtoe)، مبيّن للعشرين سنة الأخيرة من القرن العشرين. ومن المؤكّد أن مزيج الطاقة الأوّلية المتوقّع المبيّن في الشكل (10-3) ليس نتيجة النمذجة الاقتصادية المعقدة (أو حتى البسيطة!) للاقتصاد، لكنه فقط محاولة لتبيان تأثيرات تغيّر معدّلات مستوى القبول لكل مصدر أوّلي للطاقة.

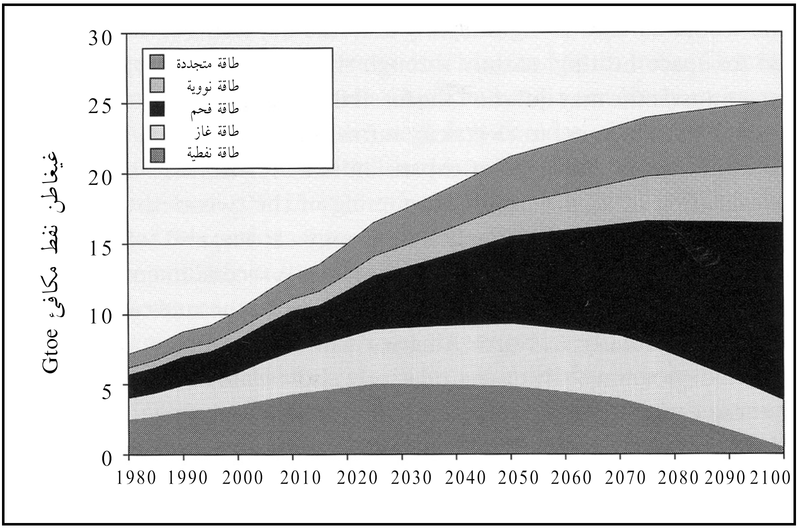
إن أول ما نحتاج إليه لبناء مخطط مثل ذلك المبيّن في الشكل (10-3) هو افتراض معدّل نمو لإجمالي طلب الطاقة العالمي. وكما رأينا في الفصل الرابع، إن إجمالي طلب الطاقة العالمي قد نما حوالى 1.75 في المئة سنوياً مركّباً على مدى العشرين سنة الأخيرة، لكن إلى حد أعلى بقليل من 4 في المئة في الصين، و6 في المئة

في الهند. وبوجود الحضور المتزايد الذي يمكن للصين والهند أن يحتلاه في الاقتصاد العالمي على مدى العقود القليلة التالية، تفترض الإسقاطات في الشكل (10-3) أن يصل مُعدّل نمو إجمالي الطلب على الطاقة العالمي إلى 2 في المئة سنوياً بين عامي 2000 و2025، الذي هو قريب جداً من توقعات وكالة الطاقة العالمية (IEA) لهذه الفترة، كما رأينا في الشكل (4-6). إن مُعدلات النمو العالية من المحتمل أن يحافظ عليها لفترات طويلة جداً في هذه الاقتصادات الناشئة وعندما تستمر تكاليف الطاقة بالارتفاع، قُمنا بافتراض أن مُعدّل النمو السنوي هو 1 في المئة سنوياً بين عامي 2025 و2050. وبالنسبة إلى النصف الأخير من القرن، افترضنا أن نمو عدد سكان العالم سوف ينخفض، وأن الإصرار المُتزايد على كفاءة الطاقة وإدارة الطلب في نقاط الاستهلاك سوف يكون له تأثير. وافترضنا أيضاً أن معدّل نمو الطاقة هو 0.2 في المئة عالمياً في السنة بين عامي 2050 و2075، وأخيراً 0.1 في المئة من عام 2075 إلى نهاية القرن. وحتى مع هذه الافتراضات المُتواضعة لمُعدّل النمو، فإن إجمالي الاستهلاك العالمي للطاقة الأوّلية سوف ينمو بعامل 2.5 من حوالى 10 جيغا طن في عام 2000، إلى 25 جيغا طن نفط مكافئ في 2100. لبناء الشكل (10-3)، تأمّلنا أن استخدام النفط المهم سوف يتناقص على نحو مفاجئ عند نهاية القرن، بسبب المصادر الميّالة إلى الانخفاض والتكاليف المُتزايدة كما ناقشنا في الفصل الخامس. إن المخزونات المُتضائلة للنفط عند الاقتراب من نهاية القرن يُحتمل استخدامها لتزوّد الوقود الاحتياطي المطلوب من أجل محركات الاحتراق الداخلي في السيارات الكهربائية ذات المقبس، على الرغم من أنه يمكن في النهاية أن يُبدّل هذا الوقود بالوقود الحيوي. كما افترضنا أيضاً انخفاضاً مشابهاً لكن أصغر في استخدام الغاز الطبيعي بسبب توافره الأفضل نسبياً، وافتراض تجارة عالمية مرتفعة للغاز باستخدام سعة خطوط أنابيب جديدة واستخدام أكبر للغاز الطبيعي المُسال (LNG).

مع الافتراضات المُستخدمة لبناء الشكل (10-3) انخفضت مُشاركة استخدام الوقود الأحفوري كجزء من إجمالي طلب الطاقة الأوّلية بشكل مُثير من 80 في المئة من إجمالي الطلب في عام 2000 إلى 39 في المئة فقط في عام 2100. لقد ازداد الاستهلاك الفعلي للوقود الأحفوري قليلاً بالفعل، بسبب الاستهلاك الزائد لـ«الفحم النظيف» المفروض من أجل توليد الطاقة الكهربائية. إن مُشاركة استخدام الطاقة النووية على مدى القرن قد زادت من 8.6 في المئة إلى أعلى من 30 في المئة من إجمالي الطاقة الأوّلية، بينما ازدادت الطاقة المتجددة من 6.13 في المئة إلى 31 في المئة من مخزون الطاقة الأولي. وإن التزايد الكبير في استخدام الطاقة النووية والطاقة المتجددة عند نهاية القرن، بالمشاركة مع معظم الفحم الذي يستخدم لتوليد الكهرباء، سيؤدي إلى تسريع الانتقال إلى «اقتصاد كهربائي». إن جزءاً كبيراً من هذا المصدر الجديد للكهرباء سوف يُستخدم لتغذية قطاع النقل، وبعضه سوف يستخدم لزيادة مشاركة الكهرباء المستخدمة لتدفئة الأبنية، عبر التبني الواسع للمضخّات الحرارية بشكل أساسي. ويمكن أن يجادل البعض حول جدوى هذا التوسع، نظراً إلى الكلفة الزائدة الذي تتطلبه البنية التحتية للكهرباء. لقد أنجز مثل هذا النوع من التوسع في الماضي، أولاً حول بداية القرن العشرين عندما كانت الكهرباء حامل طاقة جديداً نسبياً، وكانت مستخدمة لتحل محل الإنارة بالغاز والمحركات البخارية. وهناك توسع رئيس ثانٍ في البنية التحتية للكهرباء حدث في منتصف القرن العشرين، خصوصاً في أميركا الشمالية مع انتشار برامج تغذية الريف بالكهرباء. ومع أن المدى الزمني المطلوب من أجل هذه الانتقالات المبكرة قصير نسبياً، هناك توسع أكبر وتحرك نحو الاقتصاد الكهربائي الذي يؤمل أن يكون (بالتحديد) ذا جدوى على مدى المئة سنة القادمة.

إذا لم يتوسع استخدام الطاقة النووية والطاقة المتجدّدة لبعض الأسباب، إلى النطاق المفترض في سيناريو الطاقة النووية

والمتجدّدة، فهناك بديل آخر من أجل تمكين الانتقال إلى اقتصاد كهربائي وهو (سيناريو الفحم النظيف). إن استخدام الفحم في هذا السيناريو، سوف يتوسع بشكل كبير، وسوف يستخدم بشكل أولي لتوليد الكهرباء، وبالطبع أيضاً لإنتاج وقود غازي وسائل. ولخفض انبعاثات الغازات الدفيئة، فإنه يتم استخدام تكنولوجيا «الفحم النظيف»، بالاشتراك مع حجز وتخزين الكربون بشكل واسع. ومن المحتمل أن تكون محطات الطاقة الجديدة التي تعمل على الفحم مؤسسة على طريقة (IGCC) الموصوفة في الفصل السادس، مؤديةً إلى كفاءة زائدة وانبعاثات منخفضة. إضافة إلى ذلك إن أكسيد الكربون المتولد بواسطة مثل هذه المحطات سوف يحتاج إلى أن «يحجز ويخزن» باستخدام تقنيات حجز وتخزين الكربون التي لا تزال في مراحلها المبكرة من التطور. إن هذا الجانب من تكنولوجيا الفحم النظيف قد يكون الأقل تطوراً في الوقت الحاضر، وهناك حاجة إلى إنجاز عمل أكثر، تحديداً في ما إذا ستكون هذه التكنولوجيا صالحة تقنياً واقتصادياً للحجم الكبير المطلوب لحجز وتخزين معظم غاز CO2 المنتج. على الرغم من المحاولات التمهيدية لحجز وتخزين الكربون التي تمت المباشرة بها، كما ورد في الفصل السادس، نحتاج إلى إنجاز عمل أكثر للتأكّد من وجود مستودعات مناسبة حقاً لحجز وتخزين طويل الأمد للأحجام الضخمة لأكسيد الكربون الذي سوف يتحرر بواسطة الاحتراق أو التحوّل إلى غاز لكميات كبيرة من الفحم التي سوف تستخدم في أي سيناريو فحم نظيف. مع ذلك فإن خليط طاقة أوّلية لمثل هذه الاستراتيجية مبيّن في الشكل (10–4)، باستخدام افتراضات طلب الطاقة نفسها، كما في الشكل (10–3).
في هذا السيناريو افترضنا أيضاً أن كلاً من الطاقة النووية والطاقة المتجدّدة سوف تبقيان لتؤديا دوراً مهماً في خليط الطاقة الأوّلية، لكن بمعدلات نمو ثانوية أصغر بكثير مقارنةً بالسيناريو السابق. لقد وضعنا أيضاً الافتراضات نفسها حول التوفر المتضائل للنفط الخام والغاز



الشكل (10-4): مخزون الطاقة الأولي العالمي - «سيناريو الفحم النظيف»

الطبيعي كما في سيناريو الطاقة المتجدّدة والطاقة النووية. وإن المشاركة في إجمالي مخزون الطاقة الأوّلية المقدم بواسطة الفحم في إطار هذا السيناريو الجديد قد افتُرضت لتتزايد في كل عقد وصولاً إلى 50 في المئة من إجمالي مخزون الطاقة الأوّلي عند نهاية القرن مقارنةً بـ 23 في المئة عام 2000.

بالطبع، إن المزيج الفعلي لمصادر الطاقة الأولية التي سوف تتطور على مدى باقي هذا القرن من المحتمل أن تكون في موقع ما بين هذين السيناريوهين. وسوف يعتمد مزيج مخزون الطاقة الأوّلي الذي يتطوّر عبر الزمن على كلٍ من التطورات في التكنولوجيا وعلى الأولوية التي يعمل فيها كل من الأفراد والحكومات لتطوير مصادر طاقة أنظف وأكثر استدامة. في هذا الكتاب ركّزنا بشكل رئيس على الحلول التكنولوجية لتطوّر مخزون طاقة مستدام أكثر، لكن ينبغي ألا ننسى التكنولوجيا لأكثر الاختيارات أهمية المفتوحة للجنس البشري لتخفيض طلبنا من الطاقة في المقام الأول.

ويتم الرجوع أحياناً إلى ذلك «بالجانب - المرن» لسياسة الطاقة، لكن هناك برامج وُجّهت لإقناع الشركات والحكومات والأفراد لاستخدام الطاقة بكفاءة أكثر، ولتجنّب الاستخدام المُسرف والطائش، وسوف تكون هذه أدوات قوية في البحث من أجل اقتصاد أكثر استدامة. إن النجاح مع هذه الأنواع من البرامج، لأنها كانت هادفة بشكل رئيس إلى «ترشيد استهلاك الطاقة» لجزء من الأفراد المستخدمين، أو لأن سياسات «إدارة الطلب والاستهلاك للطاقة» (Demand - Side Management) متطورة أكثر لدى الشركات الضخمة والشركات الكهربائية، حيث تطلب ذلك تعديلاً واسعاً للسلوك. ويحتاج صانعو السياسة إلى أن يكونوا مدركين بأن تطور سياسات الطاقة المستدامة يحتاج المشاركة الحماسية ليس فقط للعلميين والمهندسين والاقتصاديين، لكن أيضاً للعلميين - الاجتماعيين وعامة الناس ككل، ليكونوا ناجحين. إن ما يبدو واضحاً فعلاً، هو أن هناك حلولاً صالحة للبحث من أجل مخزونات الطاقة، التي يجب أن تكون كافية لتأمين جميع متطلباتنا في المستقبل المتوقع. إن الأمر الآن عائد إلينا جميعاً: رؤساء الشركات، والسياسيين، والمستهلكين الأفراد، لنقوم بدورنا في رؤية أن مستقبل الطاقة لدينا هو مستدام بشكل حقيقي.

المراجع

Websites

European Atlas Project (2005). <http://europa.eu.int/comm/energy_-transport/Atlas/homeu.html>.

US Department of Energy (2005). <http://www.energy.gov/>

مُلحق: مُعاملات تحويل الطاقة

مُعاملات تحويل الطاقة				
1 وحدة حرارية إنكليزية (Btu)	= 1055 جول	=1.055 كيلوجول		
1 ميغا وحدة حرارية إنكليزية (MMBtu)	= 1×10^{6} (Btu)			
1 كيلوجول (kj)	=0.9478 (Btu)			
1 جيغاجول (Gj)	= 0.9478 (MMBtu)			
1 كيلو واط ساعة	=3600 كيلوجول	3.6 ميغاجول		
1 كيلو واط ساعة	= 3412 (Btu)			
1 طن مكافئ نفطي toe	= 41.87 جيغاجول	39.72 برميل نفطي (MMBtu)	7.35 برميل Bbls	
1 ميغا طن مكافئ نفطي Mtoe	= 41.87 بيتاجول	41.87×10^{15} جول	41.87×10^{12} كيلو جول	39.7×10^{12} (Btu)
1 جيغا طن مكافئ نفطي Gtoe	= 41.87 إكساجول	41.87×10^{18} جول	41.87×10^{15} كيلو جول	39.7×10^{15} (Btu)
1×10^{15} (Btu)	= 0.025189 جيغا طن مكافئ نفطي			أو 39.7 كواد (Quads)
1 برميل Bbl	42 غالون أمريكي	=35 غالون إنكليزي		
1 م3 مكافئ نفطي	6.293 برميل	0.856 طن مكافئ نفطي	= 35.843 جيغا جول	

مكافئات

10^{3} = كيلو 10^{6} = ميغا (مليون)	10^{9} = جيغا (مليار) 10^{12} = تيرا (تريليون)	10^{15} = بيتا (كوادريليون) 10^{18} = اكسا

الثبت التعريفي

مُعَامل تحميل: يُعَرف في مجال الطاقة الكهربائية بأنه نسبة القدرة المُستهلكة (الحالية) إلى قيمة القدرة العُظمى المُتوافرة دائماً من النظام.

تسوية الأحمال: عملية توزيع الحمل الكهربائي خلال فترات اليوم للاستفادة من قدرة نظام الطاقة الكهربائي المُتوافرة.

مُعَامل السعة: هو نسبة الطاقة الخرج الفعلية خلال فترة من الزمن إلى طاقة الخرج عندما تعمل المحطة بقدرتها التقديرية (التشغيلية) خلال الفترة الزمنية نفسها.

الكهرباء الشمسية الفولتضوئية: الطاقة الكهربائية المُولدة مُباشرة عن طريق التحويل الفولتضوئية لطاقة أشعة الشمس بواسطة الخلايا الشمسية الفوتوفولتاتية.

مَرْكبات كهربائية هجينة ذات المَقبس: المَركبات الكهربائية الهجينة التي يمكن شحنها عن طريق الشبكة الكهربائية بواسطة مقبس خاص.

إعادة التوليد بالفرملة: استرجاع الطاقة الحركية للمَركبة بالتوليد الكهربائي أثناء تباطؤ أو توقف المَركبة (الفرملة).

مزرعة رياحية: محطة توليد طاقة كهربائية من الرياح تحتوي على أكثر من توربين رياحي مُوزعة بشكل أفضلي لتوليد أكبر قدر ممكن من الطاقة الكهربائية.

خلية الوقود: أداة لتحويل الطاقة الكيميائية لوقود (أو مادة حاملة للطاقة) ومؤكسد إلى طاقة كهربائية مباشرةً.

التدفئة الشمسية الطبيعية: تسخين أو تدفئة المباني بطاقة الإشعاع الشمسي المباشرة حيث تعتمد كفاءة العملية على نوع وشكل التصميم للمباني.

كفاءة «المصدر - إلى - عجلات»: الكفاءة الإجمالية لتحويل الطاقة محسوبة بدءاً من طاقة المصدر الأولي (نفط أو فحم حجري أو طاقة نووية) حتى طاقة دفع العجلات للمَركبة.

المُفاعل المُولِّد: هو المفاعل النووي الذي يُنتج مصادر إضافية من الوقود النووي الانشطاري، أو يُنتج وقوداً نووياً أكثر مما يستهلك أثناء عملية التفاعل النووي.

طاقة المحيطات: الطاقة الناتجة من الأمواج والمد والجزر والتيارات البحرية في المحيطات والبحار.

ديزل حيوي: هو وقود ديزل بديل مصنوع كلياً أو جزئياً من منتجات عضوية خصوصاً من زيوت نباتية مثل زيوت فول الصويا والفول السوداني. سلسلة تحويل الطاقة: السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة بأنها تتعقب تحويلات الطاقة الأولية من مصدرها وحتى الشكل الأخير للاستهلاك، مثل حالات التدفئة و العمل الميكانيكي..

سلسلة تحويل الطاقة: السلسلة الكاملة لتحويل الطاقة بأنها تتعقب تحويلات الطاقة الأولية من مصدرها وحتى الشكل الأخير للاستهلاك، مثل حالات التدفئة، أو العمل الميكانيكي...

حامل الطاقة: هو شكل ثانوي للطاقة، كالمنتجات النفطية المكرّرة، الهيدروجين...، حيث يتم عادة تخزين الطاقة فيه ليكون جاهزاً للاستخدام لاحقاً، أي في المرحلة الأخيرة من تحويل الطاقة. تجدر الإشارة، إلى أن الكهرباء هي أيضاً حامل طاقة، ولكن يجب استهلاكها مباشرة فور الإنتاج، ويعود ذلك بأي حال إلى صعوبة تخزين الكهرباء إلى حد ما.

مَرْكبات كهربائية هجينة: حيث تَسْتخدم هذه السيارات نظام دفع يزاوج بين محرك احتراق داخلي تقليدي، يعمل كمصدر رئيس لتوليد الطاقة مع محرك كهربائي وبطارية تخزين.

مخطط سانكي: هو مخطط لانسياب الطاقة يقدم تمثيلاً مرئياً سريعاً لمقدار الانسياب في سلسلة تحويل الطاقة. في هذا المخطط، تُرسم المستطيلات أو الأسهم الممثلة لانسياب الطاقة عادةً بعرض مُعيّن يتناسب مع الجزء الذي تمثله من إجمالي الطاقة.

كثافة الطاقة: هي النسبة بين استهلاك الطاقة والناتج الإجمالي المحلي.

نسبة الاحتياطي إلى الإنتاج (R/P): هي النسبة التي تستنتج في نهاية كل سنة بقسمة المخزون من «الاحتياطي المثبت» على الإنتاج السنوي.

حجز الكربون وتخزينه: هي تقنية لا تزال في مراحلها المُبكرة جداً، يتم فيها تخفيض كمية غاز CO_2 المتدفقة إلى الغلاف الجوي لأغراض بيئية ما، وتعرف أيضاً هذه التقنية بـ «فصل الكربون».

ثبت المصطلحات
(إنجليزي ـ عربي)

Acid rain	مطر حمضي
Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)	مفاعل الماء المَغلي المُتقدم
Advanced Gas Cooled Reactor (AGR)	مفاعل مبرد بالغاز متطوّر
Amorphous silicon	سليكون لابلَّوري
Anaerobic digestion	هضم أو تفكك لاهوائي
Anthropogenic	مُسبب بفعل النشاط البشري
Back-up power	قدرة إحتياطية
Battery electric vehicles	مَركَبات كهربائية بالبطاريات
Biodiesel	ديزل حيوي
Biofuel	وقود حيوي
Biogas	غاز حيوي
Biomass	الكتلة الحيوية
Bitumen	قار
Boiling Water Reactor (BWR)	مُفاعل الماء المغلي
Breeder reactor	المُفاعل المُولِّد
Calandria	أنبوب المِبْخَرة
Carbon abatement	تخفيض الكربون
Capacity factor	مُعَامل السعة
Carbon sequestration	عزل وتخزين الكربون
Catalytic converter	مُبادل حَفزي
Cellulosic feedstock	مواد علف سليلوزية
Climate change	تغير المناخ (عالمياً)
Coal gasification	تَغويز الفحم: تحويل الفحم الحجري إلى غاز
Coal liquefaction	إسالة الفحم
Cogeneration	توليد شكلين من الطاقة بالوقت نفسه

Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)	توربين غازي ذو دارة مُركبة
Crude oil	نفط خام
Crystalline silicon	سليكون بلَّوري
Deuterium	ديوتيريوم
Diesel engine	محرك ديزل
Direct disposal	التخلص المُباشر
Distributed Energy System	نظام الطاقة الموزعة
Efficiency	كفاءة
Electricity	كهرباء
Electrolysis	تحليل كهربائي
Electrostatic precipitator	مُرسِب كهروستاتيكي
Energy carrier	حامل للطاقة
Energy demand	الطلب على الطاقة
Energy supply	مخزون/ الطاقة
Enhanced oil recovery (EOR)	طريقة استخلاص النفط المُعززة
Enriched fuel	الوقود (النووي) المُخصب
Enriched uranium	اليورانيوم المُخصب
Forcing mechanism	آلية تُخل في التوازن البيئي على الأرض
Fossil fuels	الوقود الأحفوري
Fuel cell	خلية وقود
Fuel switching	إبدال الوقود
Gas centrifuge process	طريقة النبذ المركزي للغاز
Gas Cooled Fast Reactor System (GFR)	نظام مُفاعل سريع مُبرد بالغاز
Geothermal energy	طاقة مُستخرجة من حرارة الأرض
Global carbon cycle	دورة الكربون الكونية
Global warming	تسخين الأرض
Geysers	الفوهات البركانية
Greenhouse effect	الاحتباس الحراري (تأثير البيت الزجاجي)
Greenhouse gas	غاز الاحتباس الحراري
Grid-connected	موصول بالشبكة الكهربائية
Grid-independent	مُنفصل عن الشبكة الكهربائية
Heat pump	مضخة حرارة
Heavy-water reactor	مُفاعل ماء ثقيل

Hybrid electric vehicle	عربة كهربائية هجينة
Hydroelectric power	قدرة كهرومائية
Insolation	عَزل
Internal combustion engine	محرك الاحتراق الداخلي
Landfill gas	غاز يصدر عن تفكك النفايات
Lead Cooled Fast Reactor (LFR)	مُفاعل سريع مُبرد بالرصاص
Life-cycle assessment	دراسة تحليلية لدورة الحياة
Light-water reactor	مُفاعل ماء - عادي
Liquefied hydrogen	هيدروجين مُسال
Liquefied natural gas	غاز طبيعي مُسال
Lithium-ion battery	بطارية أيون الليثيوم
Load factor	مُعَامل تحميل
Load- levelling	تسوية مستوى الحمل
Microhydro Power Plant (MPP)	محطة توليد كهرومائية صغيرة
Molten Solt Reactor (MSR)	مفاعل الملح المصهور
Municipal solid waste (MSW)	نفايات بلدية صلبة
Nuclear fusion	الاندماج النووي
Nuclear power station	محطة توليد طاقة كهربائية نووية
Nuclear proliferation	الانتشار للطاقة النووية
Nuclear waste	مُخلفات نووية
Ocean energy	طاقة المحيطات
Oil sands	الرمال النفطية
Organization of Petroleum Countries (OPEC)	مُنظمة الدول المُصدرة للنفط (اوبيك)
Particulate emissions	انبعاثات هُبابية
Particulate trap	صائد للهُباب
Passive solar heating	تدفئة شمسية غير فعّالة
PEM fuel cells	خلايا وقود ذات غشاء تبادل بروتوني أو بوليميري
moderator	الوسيط
Photovoltaic solar cells	الخلايا الشمسية الفولتضوئية
Plug-in hybrid electric vehicles	مَركبات كهربائية هجينة ذات المقبس
Polycrystalline silicon	سليكون مُتعدد البلَّورات
Power capacity	القدرة العُظمى

Pressurized Water Reactor (PWR)	مُفاعل الماء المضغوط
Price inelastic	سعر غير مرن
Pulverized fuel	وقود مطحون (للفحم عادة)
Pyrolysis	تفكيك المواد بالحرارة
Regenerative braking	إعادة التوليد بالفرملة
Renewable Energy	الطاقة المُتجددة
Saline aquifer	مكمن مياه مالحة
Smog	ضباب دخاني
Sodium Cooled Fast Reactor (SFR)	المُفاعل السريع المُبرد بالصوديوم
Solar energy	طاقة شمسية
Solar insolation	التعريض لأشعة الشمس
Solar thermal energy	الطاقة الشمسية الحرارية
Solar trough	مرآة شمسية بشكل جرن
Supercritical pressure	الضغط فوق الحرج
Synthetic crude oil	نفط خام صناعي
Synthetic fuel	وقود صناعي
Tidal barrage	سد للمد والجزر
Tidal current	تيار المد والجزر
Tidal power	قدرة المد والجزر
Trolley Bus	باص كهربائي يُغذى بمزلق عُلوي
Unavailable energy	طاقة مهدورة
Vitrified waste	نفايات مزججة
Waste heat	طاقة حرارية ضائعة
Wave energy	طاقة الأمواج
Well-to-wheels efficiency	كفاءة «مصدر -إلى- عجلات»
Wind Energy	طاقة جريان الرياح
Wind farm	مزرعة رياحية
Wind power	طاقة رياحية
Wood-waste	مُخَلفات الأخشاب
World energy demand	طلب الطاقة العالمي

ثبت المصطلحات
(عربي ــ إنجليزي)

إبدال الوقود	Fuel switching
الاحتباس الحراري (تأثير البيت الزجاجي)	Greenhouse effect
إسالة الفحم	Coal liquefaction
إعادة التوليد بالفرملة	Regenerative braking
آلية تُخل في التوازن البيئي على الأرض	Forcing mechanism
انبعاثات هُبابية	Particulate emissions
أنبوب المِبْخَرة	Calandria
الانتشار للطاقة النووية	Nuclear proliferation
الاندماج النووي	Nuclear fusion
باص كهربائي يُغذى بمزلق عُلوي	Trolley Bus
بطارية أيون الليثيوم	Lithium-ion battery
تحليل كهربائي	Electrolysis
تخفيض الكربون	Carbon abatement
التخلص المُباشر	Direct disposal
تدفئة شمسية غير فعّالة	Passive solar heating
تسخين الأرض	Global warming
تسوية مستوى الحمل	Load- leveling
التعريض لأشعة الشمس	Solar insolation
تَغويز الفحم: تحويل الفحم الحجري إلى غاز	Coal gasification
تغير المناخ (عالمياً)	Climate change
تفكيك المواد بالحرارة	Pyrolysis
توربين غازي ذو دارة مُركبة	Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)
توليد شكلين من الطاقة بالوقت نفسه	Cogeneration
تيار المد والجزر	Tidal current
حامل للطاقة	Energy carrier

Photovoltaic Solar Cells	الخلايا الشمسية الفولتضوئية
PEM fuel cells	خلايا وقود ذات غشاء تبادل بروتوني أو بوليميري
Fuel cell	خلية وقود
Life-cycle assessment	دراسة تحليلية لدورة الحياة
Global carbon cycle	دورة الكربون الكونية
Biodiesel	ديزل حيوي
Deuterium	ديوتيريوم
Oil sands	الرمال النفطية
Tidal barrage	سد للمد والجزر
Price inelastic	سعر غير مرن
Crystalline silicon	سليكون بلَّوري
Amorphous silicon	سليكون لابلَّوري
Polycrystalline silicon	سليكون مُتعدد البلَّورات
Particulate trap	صائد للهُباب
Smog	ضباب دخاني
Supercritical pressure	الضغط فوق الحرج
Wave energy	طاقة الأمواج
Solar thermal energy	الطاقة الشمسية الحرارية
Renewable Energy	الطاقة المُتجددة
Ocean energy	طاقة المحيطات
Wind Energy	طاقة جريان الرياح
Waste heat	طاقة حرارية ضائعة
Wind power	طاقة رياحية
Solar energy	طاقة شمسية
Geothermal energy	طاقة مُستخرجة من حرارة الأرض
Unavailable energy	طاقة مهدورة
Enhanced oil recovery (EOR)	طريقة استخلاص النفط المُعززة
Gas centrifuge process	طريقة النبذ المركزي للغاز
World energy demand	طلب الطاقة العالمي
Energy demand	الطلب على الطاقة
Hybrid electric vehicle	عربة كهربائية هجينة
Insolation	عَزل
Carbon sequestration	عزل وتخزين الكربون

Greenhouse gas	غاز الاحتباس الحراري
Biogas	غاز حيوي
Liquefied natural gas	غاز طبيعي مُسال
Landfill gas	غاز يصدر عن تفكك النفايات
Geysers	الفوهات البركانية
Bitumen	قار
Back-up power	قدرة إحتياطية
Power capacity	القدرة العُظمى
Tidal power	قدرة المد والجزر
Hydroelectric power	قدرة كهرومائية
Biomass	الكتلة الحيوية
Efficiency	كفاءة
Well-to-wheels efficiency	كفاءة «مصدر -إلى- عجلات»
Electricity	كهرباء
Catalytic converter	مُبادل حَفزي
Internal combustion engine	محرك الاحتراق الداخلي
Diesel engine	محرك ديزل
Nuclear power station	محطة توليد طاقة كهربائية نووية
Microhydro Power Plant (MPP)	محطة توليد كهرومائية صغيرة
Energy supply	مخزون/ الطاقة
Wood-waste	مُخَلفات الأخشاب
Nuclear waste	مُخلفات نووية
Solar trough	مرآة شمسية بشكل جرن
Electrostatic precipitator	مُرسِب كهروستاتيكي
Battery electric vehicles	مَركَبات كهربائية بالبطاريات
Plug-in hybrid electric vehicles	مَركبات كهربائية هجينة ذات المقبس
Wind farm	مزرعة رياحية
Anthropogenic	مُسبب بفعل النشاط البشري
Heat pump	مضخة حرارة
Acid rain	مطر حمضي
Capacity factor	مُعَامل السعة
Load factor	مُعَامل تحميل
Sodium Cooled Fast Reactor (SFR)	المُفاعل السريع المُبرد بالصوديوم

Pressurized Water Reactor (PWR)	مُفاعل الماء المضغوط
Boiling Water Reactor (BWR)	مُفاعل الماء المغلي
Advanced Boiling Water Reactor (ABWR)	مفاعل الماء المَغلي المُتقدم
Molten Solt Reactor (MSR)	مفاعل الملح المصهور
Breeder reactor	المُفاعل المُولِّد
Lead Cooled Fast Reactor (LFR)	مُفاعل سريع مُبرد بالرصاص
Light-water reactor	مُفاعل ماء – عادي
Heavy-water reactor	مُفاعل ماء ثقيل
Advanced Gas Cooled Reactor (AGR)	مفاعل مبرد بالغاز متطوّر
Saline aquifer	مكمن مياه مالحة
Organization of Petroleum Countries (OPEC)	مُنظمة الدول المُصدرة للنفط (اوبيك)
Grid-independent	مُنفصل عن الشبكة الكهربائية
Cellulosic feedstock	مواد علف سليلوزية
Grid-connected	موصول بالشبكة الكهربائية
Distributed Energy System	نظام الطاقة الموزعة
Gas Cooled Fast Reactor System (GFR)	نظام مُفاعل سريع مُبرد بالغاز
Municipal solid waste (MSW)	نفايات بلدية صلبة
Vitrified waste	نفايات مزججة
Crude oil	نفط خام
Synthetic crude oil	نفط خام صناعي
Anaerobic digestion	هضم أو تفكك لاهوائي
Liquefied hydrogen	هيدروجين مُسال
moderator	الوسيط
Enriched fuel	الوقود (النووي) المُخصب
Fossil fuels	الوقود الأحفوري
Biofuel	وقود حيوي
Synthetic fuel	وقود صناعي
Pulverized fuel	وقود مطحون (للفحم عادة)
Enriched uranium	اليورانيوم المُخصب

فهـــــرس

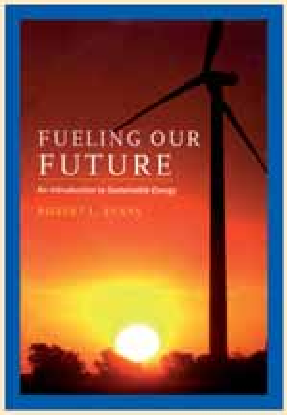
- ن -

- هـ -

- و -

شحن مستقبلنا بالطاقة

مدخل إلى الطاقة المستدامة(*)



(*) الكتاب الأول من الطاقة

السلسلة: تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

الكتاب: من أهم ما تواجهه البشرية اليوم، هو المشهد العام لتغيّر المناخ العالمي الناتج بشكل رئيسٍ من استخدامنا المفرط للطاقة.

يُقدّم هذه الكتاب فكرة موجزة عن طلب الطاقة الحالي، وأنماط التزوّد بها، ويُبيّن بأسلوب مبسّط أن اعتمادنا على الوقود الأحفوري يمكن أن يتغيّر مع الزمن، فننتقل في المستقبل القريب إلى نُظم طاقة أكثر استدامة. كما يلقي الضوء على القضايا المتعلقة بالديناميكا الحرارية، لرفع كفاءة عمليات التحويل، الأمر الذي يُسهم في توضيح أنظمة التزوّد التي تكون مناسبة باعتبارها جزءاً من عملية الانتقال إلى مستقبل مُستدام بالطاقة. ويُعتقد أن الموارد المرشحة للمستقبل هي: الفحم الحجري النظيف مع حجز وتخزين الكربون، والطاقات المتجددة، والطاقة النووية.

المؤلف: **روبرت ل. إيفانز** (Robert L. Evans): حائزٌ الدكتوراه من جامعة كامبردج، أستاذ الهندسة الميكانيكية في جامعة بريتش كولومبيا (UBC) وجامعة فانكوفر (كندا).

المترجم: **د. فيصل حردان**: حائزٌ الدكتوراه في مجال الطاقة الكهربائية (1996) من جامعة برادفورد - المملكة المتحدة.

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

1. **المياه**
2. **البترول والغاز**
3. **البتروكيمياء**
4. **النانو**
5. **التقنية الحيوية**
6. **تقنية المعلومات**
7. **الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات**
8. **الفضاء والطيران**
9. **الطاقة**
10. **المواد المتقدمة**
11. **البيئة**

المنظمة العربية للترجمة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

الثمن: 15 دولاراً
أو ما يعادلها

ISBN 978-9953-0-1886-7

شحن مستقبلنا بالطاقة
مدخل إلى الطاقة المستدامة
روبرت ل. إيفانز
(9 - 1)